

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
GUSTAVO DE LIMA RECICAR

**EFEITO DOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO MANUAL E LAMINAÇÃO
TERMOMECÂNICA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL
COMPÓSITO CARBONO-EPÓXI**

São Bernardo do Campo

2022

GUSTAVO DE LIMA RECICAR

**EFEITO DOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO MANUAL E LAMINAÇÃO
TERMOMECÂNICA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAL
COMPÓSITO CARBONO-EPÓXI**

Dissertação apresentada ao Centro
Universitário FEI, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica. Orientado pelo Prof.
Dr. Sergio Delijaicov.

São Bernardo do Campo

2022

Lima Recicar, Gustavo de.

EFEITO DOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO MANUAL E
LAMINAÇÃO TERMOMECÂNICA NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE MATERIAL COMPÓSITO CARBONO-EPÓXI /
Gustavo de Lima Recicar. São Bernardo do Campo, 2022.

74 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Delijaicov.

1. Compósito Carbono-Epóxi. 2. Laminação Termomecânica. 3.
Processamento de Compósitos Poliméricos. I. Delijaicov, Sergio, orient.
II. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais e a meu irmão, que são meus verdadeiros professores de vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jan e Kátia e ao meu irmão Gabriel, meus educadores que sempre me ensinaram sobre a importância do conhecimento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Delijaicov, pela dedicação e pelo apoio incondicional nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Roberto Bortolussi, por todas as orientações e, principalmente, pelos ensinamentos passados a mim durante o desenvolvimento deste trabalho.

A Prof.^a Dr.^a Gigliola Salerno, por me apresentar ao universo das pesquisas científicas ainda durante a graduação e por ter me acompanhado durante toda essa jornada.

Ao Prof. Dr. William Naville, que aceitou participar da banca de qualificação e cuja avaliação contribuiu positivamente para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Wallace Gusmão Ferreira, pela sua disponibilidade ao aceitar o convite para participar na banca de defesa deste trabalho.

A todos os funcionários do CLM do Centro Universitário da FEI, por toda a dedicação e apoio durante a realização dos procedimentos experimentais, com especial agradecimento aos meus amigos dos Laboratórios de Materiais.

Ao Centro Universitário da FEI, pelos recursos e infraestrutura que permitiram a realização deste trabalho.

“O que é um mestre, senão um aluno mestre?
E se isso for verdade, então existe em cada um
de nós uma responsabilidade de continuarmos
nos aprimorando e explorando novos
caminhos.”

Neil Peart

RESUMO

Os processos de manufatura de materiais compósitos estão em constante evolução devido a crescente demanda por materiais com propriedades e características mais específicas e por métodos que sejam mais eficientes, aliando baixo custo a alta produtividade. O processo de conformação termomecânica, que utiliza forças de compressão para melhorar as características estruturais do compósito, é uma alternativa ao processo de laminação manual, que emprega apenas o vácuo para esta finalidade. O entendimento da influência dos parâmetros de processamento termomecânico torna-se essencial para que se obtenha dados que possam ser utilizados futuramente em simulações e na otimização do processo. O presente trabalho teve como finalidade verificar a existência de possíveis efeitos decorrentes do processo de laminação termomecânica sobre as propriedades mecânicas à tração de um material compósito Carbono/Epóxi. Para isso o Delineamento Central Composto foi selecionado como planejamento fatorial, tendo como variáveis independentes temperatura e pressão de compressão e variáveis dependentes o limite de resistência a tração e o módulo de elasticidade. O resultado deste experimento não evidenciou nenhuma influência por parte dos parâmetros de processo, a exceção da temperatura que gera influência sobre o limite de resistência. Em paralelo, as propriedades mecânicas do material processado termomecanicamente foram comparadas com um material que fora produzido por laminação manual. A variação nos valores das propriedades foi evidenciada com alterações entre 45% e 75%, comprovando as vantagens em se utilizar o processo de laminação termomecânica.

Palavras-chave: Compósito Carbono/Epóxi. Laminação termomecânica. Processamento de Compósitos Poliméricos.

ABSTRACT

The manufacturing processes of composite materials are constantly evolving due to the growing demand for materials with more specific properties and characteristics and for methods that are more efficient, combining low cost with high productivity. The thermo-mechanical forming process, which uses compression forces to improve the structural characteristics of the composite, is an alternative to the manual rolling process, which employs only vacuum for this purpose. Understanding the influence of thermo-mechanical processing parameters becomes essential to obtain data that can be used in future simulations and process optimization. The purpose of this work is to verify the possible effects of the thermo-mechanical rolling process on the tensile mechanical properties of a carbon/epoxy composite material. A Central Composite DoE was selected as factorial planning having as independent variables temperature and pressure and as dependent variables tensile strength and Young's modulus. As a result of this experiment no interference arising from the processing parameters was noted, with the exception to the temperature that affects the resulting tensile strength of the composite. The mechanical properties of the material prepared by thermo-mechanical process were compared to those of a material made by manual rolling process. The variation in the values of the properties was evidenced with alterations between 45% and 75%, proving the advantages in using the process of thermo-mechanical rolling.

Keywords: Carbon/Epoxy Composite. Thermomechanical Forming. Manufacturing of Polymeric Composites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos Materiais Compósitos	15
Figura 2 – Principais configurações dos compósitos poliméricos	17
Figura 3 – Influência das características das fases fibra e matriz sobre as propriedades finais de um compósito	18
Figura 4 – Variação da tensão de resistência em função do diâmetro das fibras de carbono ...	20
Figura 5 – Variação das tensões em função da razão de aspecto	20
Figura 6 – Tecido de fibras de carbono	21
Figura 7 – Representação de um compósito com arranjo bidirecional 0°/90°	22
Figura 8 – Representação da interface Carbono/Epóxi	26
Figura 9 – Mecanismos de adesão interfacial	27
Figura 10 – Processo de laminação manual em molde aberto	28
Figura 11 – Ciclo de cura de resina epóxi	30
Figura 12 – Representação de laminação a vácuo	31
Figura 13 – Exemplo de aplicação incorreta do bag de vácuo.....	32
Figura 14 – Tecido de Fibras de Carbono bidirecionais RC200P.....	37
Figura 15 – Materiais utilizados na preparação	37
Figura 16 – Resina Epóxi AR260 e Endurecedor AH260	38
Figura 17 – Bomba de vácuo	38
Figura 18 – Estufa Fanem 320	39
Figura 19 – Representação da placa com corpos de prova para ensaio de tração	40
Figura 20 – Material laminado preparado para a etapa de cura	41
Figura 21 – Prensa hidráulica BOVENAU P15ST	44
Figura 22 – Placas durante o processo de pós-cura	44
Figura 23 – Material com processamento concluído	45
Figura 24 – Corte a jato d'água Flow MACH 2	46
Figura 25 – Corpos de prova após o corte	47
Figura 26 – Extensômetro PA-06-125TG-350-L	47
Figura 27 – Corpos de Prova finalizados	48
Figura 28 – MTS 810 e Spider 8	49
Figura 29 – Corpo de prova preparado para ensaio de tração	50
Figura 30 – Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 1	54
Figura 31 – Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 2	54

Figura 32 – Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 3	55
Figura 33 – Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 4	55
Figura 34 – Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 5	56
Figura 35 – Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 6	56
Figura 36 – Curva Tensão x Deformação P.1	57
Figura 37 – Curva Tensão x Deformação P.2	57
Figura 38 – Curva Tensão x Deformação P.3	58
Figura 39 – Curva Tensão x Deformação P.4	58
Figura 40 – Curva Tensão x Deformação P.6	59
Figura 41 – Curva Tensão x Deformação P.7	59
Figura 42 – Curva Tensão x Deformação P.8	60
Figura 43 – Curva Tensão x Deformação P.9	60
Figura 44 – Diagrama de Pareto das variáveis independentes sobre a resistência mecânica ...	50
Figura 44 – Diagrama de Pareto das variáveis independentes sobre módulo de elasticidade ..	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as propriedades mecânicas axiais de fibras e metais	19
Tabela 2 – Comparação entre as propriedades mecânicas de polímeros e metais	23
Tabela 3 – Parâmetros do Planejamento considerando todos os pontos	36
Tabela 4 – Relação de Corpos de Prova com Parâmetros de Processamento	36
Tabela 5 – Dimensões dos Corpos de Prova	41
Tabela 6 – Parâmetros de cura e pós-cura	43
Tabela 7 – Parâmetros de processamento das placas	44
Tabela 8 – Classificação dos materiais em função do processamento	52
Tabela 9 – Análise das propriedades do material de Ponto Central	61
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração	63
Tabela 11 – Planejamento experimental completo	64
Tabela 12 – ANOVA das variáveis independentes sobre a resistência mecânica	65
Tabela 13 – ANOVA das variáveis independentes sobre o módulo de elasticidade	67
Tabela 14 – Ensaios de tração para laminação a vácuo	68
Tabela 15 – Comparação entre Laminação Manual e Laminação Termomecânica	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	14
3.1.1 Considerações e Definições sobre Compósitos	14
3.1.2 Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados por Fibras	16
<i>3.1.2.1 Reforço por Fibras</i>	<i>18</i>
<i>3.1.2.2 Matrizes Poliméricas</i>	<i>22</i>
<i>3.1.2.3 Interface Fibra-Matriz</i>	<i>25</i>
3.2 LAMINAÇÃO DE COMPÓSITOS	27
3.2.1 Laminação de Compósitos	27
3.2.1 Considerações Sobre a Laminação Termomecânica de Compósitos	33
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	34
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	34
4.2 MATERIAIS	37
4.2.1 Lista de materiais	37
4.2.2 Preparação do Compósito Carbono/Epóxi	40
4.3 PROCESSAMENTO DO COMPÓSITO	42
4.3.1 Laminação Manual	42
4.3.2 Conformação Termomecânica	43
4.4 INSTRUMENTAÇÃO E ENSAIOS	46
4.4.1 Corte e Instrumentação dos Corpos de Prova	46
4.4.2 Ensaio de Tração	48
4.4.3 Determinação das Propriedades à Tração	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 LEVANTAMENTO DAS CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO	52
5.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	61

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	64
5.4 COMPARAÇÃO COM LAMINAÇÃO MANUAL.....	67
6 CONCLUSÕES.....	69
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

Apesar dos grandes avanços nas pesquisas sobre materiais compósitos terem ocorrido a partir do início dos anos 1960, a história desta família de materiais pode ser rastreada a períodos muito mais distantes na história humana. Materiais fibrosos, que hoje seriam considerados como compósitos existem desde o Antigo Egito com exemplares de ferramentas de escrita confeccionadas com fibras extraídas da planta papiro datando de 4.000 a.C., e por volta do ano de 1.300 a.C., com o avanço das tecnologias da época, estes materiais já eram encontrados em construções e embarcações (HERAKOVICH, 1998).

O grande salto na evolução dos materiais compósitos se deu na década de 1940. Com o avanço da Segunda Guerra Mundial, tornou-se necessário o desenvolvimento de novos materiais com excelentes propriedades estruturais, isto é, materiais com elevada resistência mecânica. E assim, foram desenvolvidos os Plásticos Reforçados. No ano de 1942 foi desenvolvido um sistema de cura a baixa pressão para resinas poliéster e até o final da década, materiais reforçados com fibras de vidro eram amplamente utilizados em aplicações estruturais (LUBIN, 1982).

Nos anos de 1960 surge uma nova demanda para materiais que apresentassem propriedades cada vez mais específicas. Desta vez a demanda partia da indústria aeroespacial, onde materiais mais resistentes, rígidos e principalmente mais leves tornavam-se essenciais (CHAWLA, 2019). Os projetos desenvolvidos possuíam características de operação extremamente rigorosas, características essas que qualificavam todos os materiais conhecidos pela engenharia como inadequados. A solução encontrada veio a ser o desenvolvimento de novos materiais compósitos, onde as propriedades seriam projetadas para que assim atendessem a todos os requisitos dos projetos.

Os materiais compósitos também permitiram uma integração entre os departamentos de engenharia e design durante todos os níveis de desenvolvimento de um produto, desde a concepção até a construção de um protótipo (CHAWLA, 2019).

Pode-se dizer que a grande vantagem dos materiais compósitos não se encontra em apenas uma única propriedade, mas sim na combinação das propriedades resultantes. Esta é a principal característica dessa família de materiais e que faz com que cada compósito seja um material único e extremamente eficiente para a aplicação ao qual foi projetado.

A constante evolução dos materiais e meios de produção aliados ao crescimento incessante da indústria evidenciaram a necessidade do desenvolvimento de novos processos de fabricação de compósitos, processos que fossem cada vez mais eficientes, realizando a preparação do material e menores tempos e que apresentassem ótima repetibilidade, mantendo as características e propriedades desejadas durante muitos ciclos de processamento. Estes requisitos foram alcançados com o desenvolvimento de novos processos, contudo estes processos requerem equipamentos específicos, o que reduziu a acessibilidade a estes métodos.

O presente trabalho tem a finalidade de investigar as possíveis influências de um processo de laminação termomecânica sobre as propriedades mecânicas de um compósito Carbono/Epóxi, que é amplamente utilizado pela indústria nas mais diversas aplicações.

O processo de laminação termomecânica é a primeira alternativa ao processo de laminação manual, assim torna-se fundamental o entendimento dos possíveis efeitos gerados por este processo sobre as propriedades dos compósitos, de modo que se obtenha um processo relativamente simples, mas com alta produtividade e repetibilidade.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivos principais a determinação das propriedades mecânicas de um compósito Carbono/Epóxi preparados por um método de laminação termomecânica e a verificação da existência de interferência deste processo sobre as propriedades mecânicas do material. As propriedades obtidas serão: Tensão limite de resistência a tração; tensão de fratura; módulo de elasticidade. A validação será realizada por meio da comparação dos resultados obtidos em ensaios de tração realizados em materiais preparados por laminação manual e por laminação termomecânica.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar os possíveis efeitos do processo de conformação termomecânica sobre as propriedades mecânicas do material;
- Avaliar o comportamento mecânico do material quando submetido a esforços de tração;
- Verificar a influência dos parâmetros pressão de compressão e temperatura de cura sobre o comportamento mecânico do compósito;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

3.1.1 Considerações e Definições sobre Compósitos

Os compósitos são materiais heterogêneos, isto é, são constituídos a partir da união de dois ou mais materiais distintos. Usualmente, um compósito é formado a partir da combinação de duas fases, sendo a primeira uma fase de reforço e a segunda uma fase denominada matriz, tendo como exemplo uma resina polimérica reforçada por fibras. Esta união de materiais tem como principal finalidade a obtenção de propriedades e características pré-determinadas (LUBIN, 1982).

Os materiais que constituem um compósito não se misturam quimicamente por completo gerando um novo material, mas trabalham em conjunto. A região de interação entre as fases reforço e matriz é denominada interface e o entendimento das características físicas e químicas da interface é fundamental, pois esta região é determinante para o comportamento mecânico do compósito finalizado (LUBIN, 1982).

As propriedades mecânicas dos materiais que compõem o compósito são essenciais para o resultado final, uma vez que o material construído apresentará uma combinação de propriedades das suas fases. É importante ressaltar que as propriedades mecânicas finais de um compósito jamais serão obtidas pelos seus materiais constituintes quando separados.

A classificação dos compósitos pode ser feita baseada na sua composição estrutural, podendo ser materiais reforçados por partículas, fibras ou laminados ou estruturais (LUBIN, 1982; CALLISTER, 2012). Dentro dessas classificações ainda podem existir subdivisões, como evidenciado na figura 1.

Figura 1 - Classificação dos Materiais Compósitos



Fonte: Adaptado de Callister, 2012

Como observado, os materiais de reforço podem ser encontrados na forma de partículas, flocos, fibras curtas, fibras contínuas ou lâminas de tecido, no entanto a grande maioria dos compósitos é constituída por materiais em forma de fibras (CHAWLA, 2019).

Isso ocorre devido ao fato de que os materiais são mais resistentes e rígidos quando se encontram em uma forma fibrosa do que em qualquer outra geometria, e aliado a isso pode-se considerar também a elevada flexibilidade das fibras (CHAWLA, 2019).

A fase matriz tem como principais funções garantir a união entre o material de reforço, proteger a superfície do compósito contra danos e atenuar adversidades que possam surgir durante a utilização do material. Também é essencial que a adesão entre a matriz e o reforço seja excelente, pois a adesão é responsável por realizar a transferência de esforços provenientes de uma solicitação mecânica para o material de reforço. Portanto, pode-se afirmar que as propriedades mecânicas do material compósito são altamente dependentes da adesão entre as fases (REZENDE, 2011).

As matrizes podem ser fabricadas com materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos. Os materiais poliméricos podem ainda ser subdivididos em Termoplásticos ou Termorrígidos. As matrizes termoplásticas produzem materiais que aliam alta resistência mecânica a um baixo custo de processamento (HERAKOVICH, 1997).

Polímeros termorrígidos ou termofixos são amplamente utilizados no universo dos compósitos na forma de resinas. Basicamente três tipos são utilizados, resinas poliéster, epóxi e poli-imidas. A diferença entre as três resinas se resume a temperatura de operação para o compósito, 100°C para as resinas poliéster, 175°C para resinas epóxi e até 300°C, por um curto período, para as poli-imidas (HERAKOVICH, 1997).

Matrizes metálicas normalmente são constituídas de alumínio, titânio ou cobre. Seu uso pode ser justificado pelas conhecidas propriedades físicas e mecânicas dos metais, como altas resistência mecânica e rigidez, grandes gradientes de temperatura suportados, variando de 300°C até 800°C. No entanto existem desvantagens como peso elevado, suscetibilidade a corrosão e alguns problemas relacionados à interface reforço-matriz (HERAKOVICH, 1997).

Materiais cerâmicos são muito duros e frágeis, apresentam baixíssimas deformações no instante da falha, também falham em apresentar uniformidade de suas propriedades. No entanto, o uso dessa família de materiais como matéria prima para matrizes é facilmente justificado quando são observadas as altíssimas temperaturas suportadas, os elevados módulos de elasticidade e os baixos valores de densidade das cerâmicas. Estes materiais podem facilmente suportar temperaturas superiores a 2.000°C. Como materiais comumente utilizados pode-se citar Carbono, Carbetto de Silício e Nitreto de Silício (HERAKOVICH, 1997; CHAWLA, 2019).

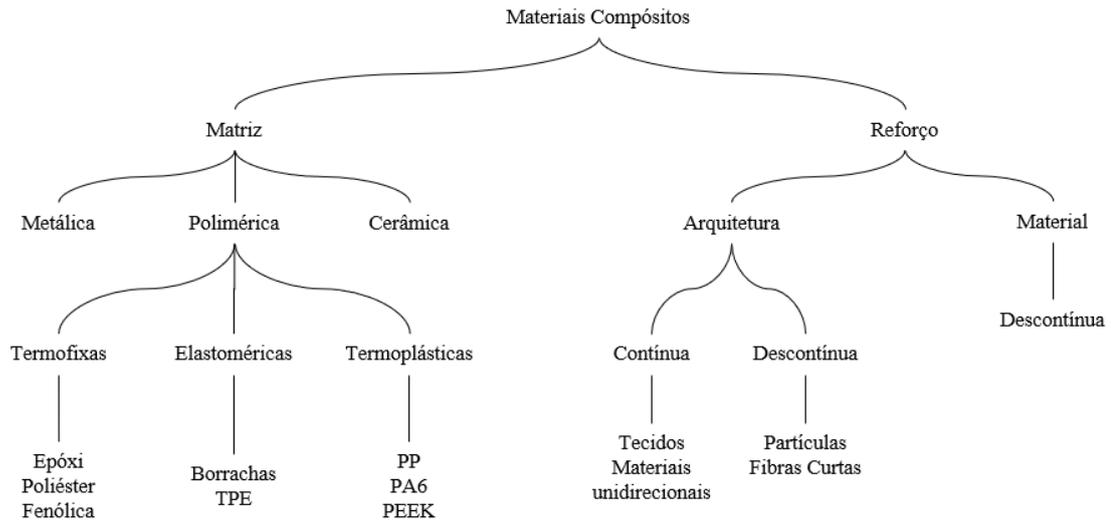
3.1.2 Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados por Fibras

Devido à natureza deste trabalho, serão enfatizados os compósitos de matriz polimérica reforçado por fibras e os Plásticos Reforçados por Fibras de Carbono (CFRP). Nesta seção serão detalhados os mecanismos de reforço por fibras, matrizes poliméricas e as interações que ocorrem na região de interface fibra-matriz.

O constante avanço das tecnologias criou a necessidade de materiais dedicados para funções cada vez mais específicas e, conseqüentemente, com propriedades particulares pré-definidas. Nesse meio, os compósitos poliméricos tornaram-se favoritos por combinarem de forma otimizada propriedades mecânicas com a baixa densidade, permitindo que esses materiais sejam utilizados em projetos que variam desde equipamentos esportivos até aeronaves militares e comerciais (FRIEDRICH et al, 2012).

O diagrama representado na figura 2 caracteriza as combinações possíveis de matrizes com materiais de reforço para os compósitos poliméricos.

Figura 2 - Principais configurações dos compósitos poliméricos



Fonte: Adaptado de Friedrich et al. 2012

Como discutido anteriormente, as propriedades resultantes de um compósito dependem de uma sinergia entre as fases matriz e reforço. A figura 3 demonstra o impacto causado pelas fases distintas sobre o comportamento do material em relação a diversas propriedades considerando um compósito de matriz polimérica reforçado por fibras.

Nota-se, por exemplo, que a resistência e rigidez do material são altamente dependentes das fibras de reforço enquanto que propriedades como condutividade térmica e condutividade elétrica são muito influenciadas pelo material que constitui a matriz (FRIEDRICH et al, 2012).

Uma das justificativas para a preferência de fibras como material de reforço encontra-se na Tabela 1. Nota-se que as fibras apresentam, em todos os casos, densidades inferiores aos metais, com apenas algumas exceções em que a densidade se aproxima a um valor semelhante ao encontrado para o alumínio. Comparando as fibras entre si, também se torna evidente as variações entre os valores de módulo de elasticidade (E).

Vale destacar as discrepâncias encontradas ao comparar as tensões limite de resistência das fibras com as respectivas tensões dos metais.

Tabela 1 – Comparação entre as propriedades mecânicas axiais de fibras e metais

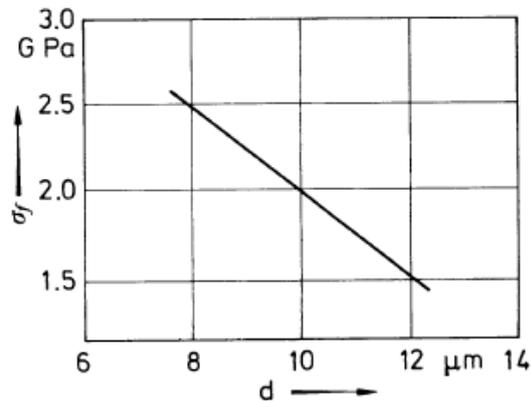
Material	Densidade [g/cm³]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Tensão Limite de Resistência [MPa]
Metais				
Aço	7,80	200	0,32	1724
Alumínio	2,70	69	0,33	483
Titânio	4,50	91	0,36	758
Fibras				
AS4 (Carbono)	1,80	235	0,20	3599
P100 (Carbono)	2,15	724	0,20	2199
Boro	2,60	385	0,21	3799
Kevlar 49	1,44	124	0,34	3620
S-2 Glass (vidro)	2,46	87	0,23	4585
E-Glass (vidro)	2,58	69	0,22	3450

Fonte: Adaptado de Herakovich, 1997

De acordo com Drescher (1969), as fibras devem apresentar três características fundamentais para que sejam eficientemente empregadas como reforço:

1. Efeito de Tamanho. As fibras devem ser de diâmetros pequenos, pois de acordo com a teoria, pequenas dimensões implicam em baixas probabilidades de ocorrência de defeitos no material. A figura 4 demonstra a variação do limite de resistência em função a variação do diâmetro de uma fibra de carbono;

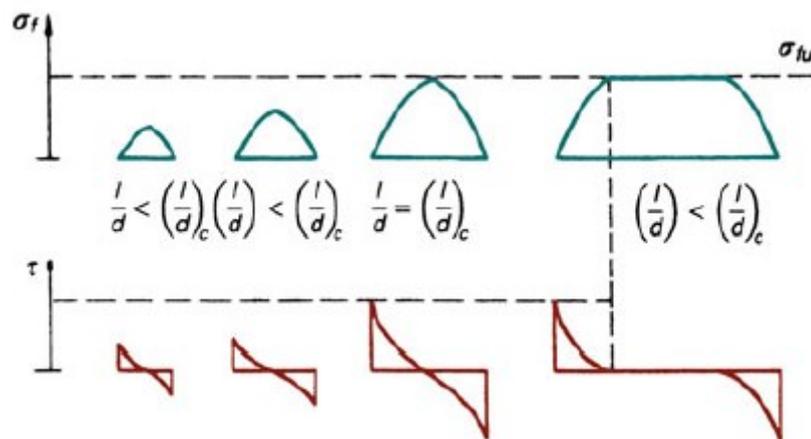
Figura 4 - Variação da tensão de resistência (σ_f) em função ao diâmetro da fibra de carbono (d)



Fonte: Adaptado de Chawla (1998); Original: Lamotte e Perry (1970)

- Alta razão de aspecto. Este parâmetro descreve a razão entre comprimento (l) e diâmetro (d) de uma fibra. Uma alta razão de aspecto permite que maiores parcelas da carga aplicada ao compósito sejam transferidas da matriz para as fibras de reforço. Essencialmente quanto maior for a razão de aspecto, maior será a área de interface fibra-matriz. Observa-se que existe um limite para as tensões (figura 5);

Figura 5 - Variação das tensões de resistência (σ_f) e cisalhamento (τ) em função da razão de aspecto



Fonte: Adaptado de Chawla (2019)

- Alto grau de flexibilidade. A flexibilidade permite liberdade de forma para a confecção de compósitos, conseqüentemente trazendo maiores liberdades para projetos. Materiais flexíveis também contribuem para o processamento, uma vez que mais técnicas podem ser empregadas para a fabricação do compósito;

Deste modo, pode-se afirmar que as propriedades finais de um compósito reforçado por fibras são altamente dependentes da geometria das fibras de reforço, e não apenas das propriedades particulares de cada fase constituinte (CHAWLA, 2019).

A preferência pelo uso de fibras longas para materiais de alta performance é explicada quando se analisa o comportamento mecânico de um compósito.

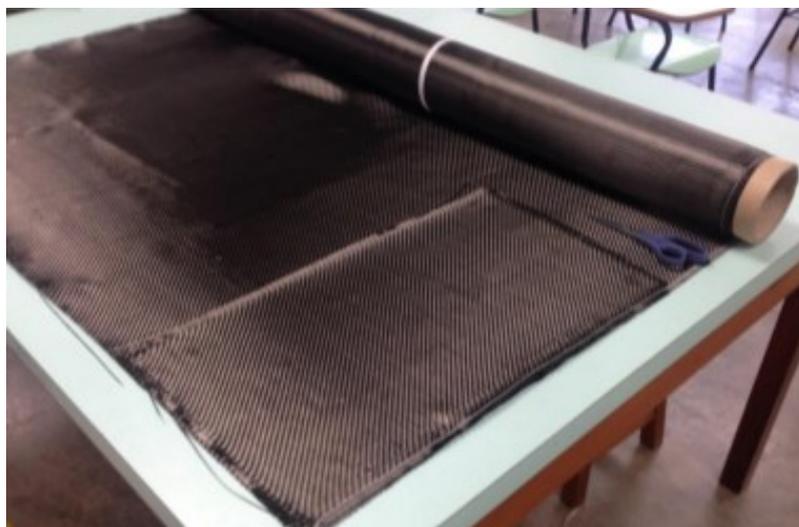
Sabe-se que as cargas que agem sobre o material são transferidas da matriz para as fibras na forma de forças cisalhantes e que essas forças atuam diretamente sobre a superfície das fibras, de modo que o material de reforço deva apresentar uma grande área superficial, para que as forças resultantes do carregamento sejam transferidas e distribuídas de modo mais eficiente (FRIEDRICH et al, 2012).

Outro motivo para que se justifique essa preferência se deve ao fato de que a orientação das fibras pode ser precisamente controlada durante a preparação do compósito, gerando um material que atenda as solicitações necessárias (FRIEDRICH et al, 2012).

Também é importante ressaltar que além das propriedades mecânicas das fibras, sua orientação em relação a direção de carregamento provoca diferentes reações quanto ao comportamento mecânico do final (HUANG et al, 2021).

A geometria usual para compósitos de alta performance compreende uma montagem de várias camadas de fibras, geralmente na forma de tecidos (figura 6), que são empilhadas de acordo com a orientação desejada, podendo ser unidirecional (0°), bidirecional ($0^\circ/90^\circ$ ou $45^\circ/-45^\circ$), ou outras. A figura 7 mostra um arranjo bidirecional para as fibras de reforço.

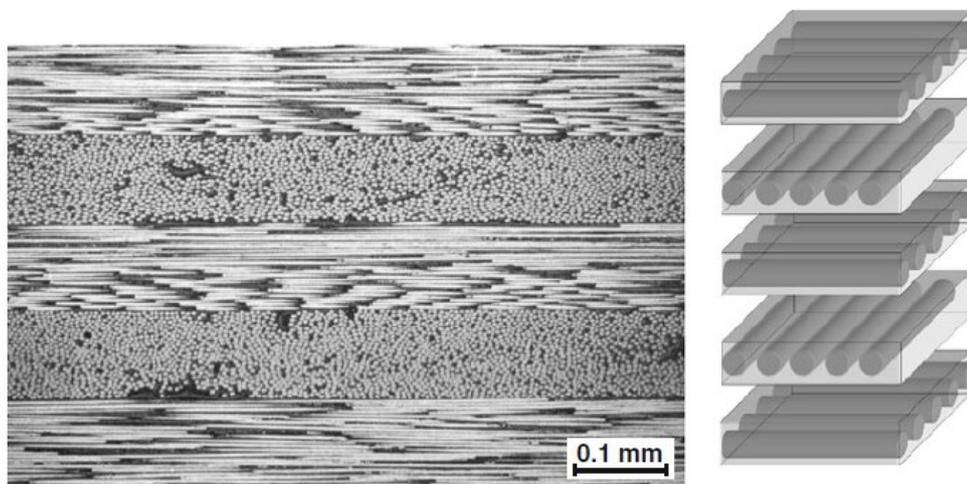
Figura 6 - Tecido bidirecional de fibras de carbono



Fonte: Do autor

Existe uma desvantagem neste modelo de construção de compósitos que é o fato de não existirem fibras que atravessam as camadas seguindo uma orientação transversal ao longo da espessura do material, assim, situações que envolvem cargas extremas podem gerar um defeito denominado delaminação, que consiste no descolamento das várias camadas de fibras, decorrente do rompimento da região interfacial (FRIEDRICH et al, 2012).

Figura 7 - Representação de um compósito com arranjo bidirecional $0^\circ/90^\circ$



Fonte: Adaptado de Friedrich et al. 2012

3.1.2.2 Matrizes Poliméricas

As matrizes são responsáveis por transferir e distribuir igualmente as forças geradas pelas solicitações mecânicas aplicadas sobre o compósito para as fibras de reforço, manter a estrutura geral do compósito e proteger as fibras de quaisquer fatores externos que possam danificar o material (HUANG et al. 2021).

Matrizes poliméricas podem ser classificadas como termofixas ou termoplásticas, de acordo com o tipo de polímero que as constitui. A tabela 2 sumariza os principais polímeros utilizados como matriz comparando suas propriedades mecânicas com as propriedades relativas aos metais (CLYNE & HULL, 2019) (HUANG et al. 2021).

O conhecimento dessas propriedades assim como das propriedades do material de reforço é um fator determinante para a escolha de materiais e otimização de um projeto. Também considerando características mais sutis como propriedades térmicas ou propriedades físicas que afetam diretamente o processamento do material (CLYNE & HULL, 2019).

Tabela 2 - Comparação entre as propriedades mecânicas de polímeros e metais

Material	Densidade [g/cm³]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Tensão Limite de Resistência [MPa]
Metais				
Aço	7,80	200	0,32	1724
Alumínio	2,70	69	0,33	483
Titânio	4,50	91	0,36	758
Polímeros				
Epóxi	1,25	3,5	0,38	40
Poliéster	1,38	3,0	0,37	40
PEEK	1,30	4,0	0,37	70
Polycarbonato	1,15	2,4	0,33	60

Fonte: Adaptado de Clyne & Hull, 2019 e Herakovich, 1997

Os polímeros termofixos são utilizados na forma de resinas quando empregados como matrizes e tem como exemplos mais comuns as resinas epóxi, poliéster e resinas vinílicas. As resinas poliméricas são misturadas com um agente endurecedor que inicia a reação de polimerização e essa etapa é usualmente realizada durante a preparação do material compósito. A reação resulta em um material sólido caracterizado por uma microestrutura extremamente rígida devido a formação de um alto índice de ligações cruzadas. As propriedades mecânicas do polímero são altamente dependentes das características dessa microestrutura, como comprimento das cadeias poliméricas e densidade de ligações cruzadas (CLYNE & HULL, 2019).

O processo de cura que forma os polímeros termofixos pode ser realizado a temperatura ambiente, no entanto é geralmente realizado em ambientes controlados, com padrões de aquecimento ou temperaturas pré-determinadas, para otimizar a formação de ligações cruzadas e conseqüentemente o comportamento mecânico do material. Pode ser empregado um processo de aquecimento a temperaturas relativamente altas após a cura ter sido concluída, com a finalidade de minimizar modificações que podem ocorrer sobre as propriedades (CLYNE & HULL, 2019).

Dos polímeros citados acima, as resinas epóxi são grandes favoritas no universo dos compósitos poliméricos, existindo um amplo espectro de resinas, endurecedores e modificadores com propriedades distintas, comprovando a sua versatilidade (SEFERIS & NICOLAIS, 1983).

Penn e Wang descrevem quatro fatores que justificam a preferência pela escolha das resinas epóxi como matéria prima para a matriz (PETERS, 1998).

São elas:

1. As resinas epóxi são materiais polares, portanto apresentam boa aderência a fibras de reforço;
2. As variações dimensionais sofridas após o processo de cura são mínimas, assim o material possui excelente estabilidade dimensional;
3. A reação química entre as resinas epóxi e os endurecedores não produz substâncias voláteis ou água, minimizando o surgimento de bolhas e vazios entre as camadas do compósito;
4. Resinas epóxi após curadas possuem alta densidade de ligações cruzadas, conferindo ao material boa resistência química. Também sendo um material de boas propriedades de isolamento elétrico;

Em conjunto com essas características, as resinas epóxi são extremamente versáteis, pois trata-se de um material no qual a mistura de resina e endurecedor pode ser cuidadosamente formulada para que se atenda requisitos específicos de processamento e de performance (PETERS, 1998).

Já os polímeros termoplásticos tem suas propriedades definidas pelas características inerentes as unidades monoméricas que os formam e a suas elevadas massas molares. Diferentemente dos termofixos, os termoplásticos não apresentam ligações cruzadas (CLYNE & HULL, 2019).

Tem-se como termoplásticos comumente utilizados o Polipropileno (PP), Poliamida (PA), Poliésteres Termoplásticos (PET) e Policarbonatos. Os compósitos de matriz termoplástica possibilitam o desenvolvimento de materiais de alta resistência em conjunto com um baixo custo e alto volume de produção (HERAKOVICH, 1997) (CHAWLA, 2012).

Berglund (1998) argumenta que o uso dos compósitos termoplásticos se baseia em três fatores. O processamento desses materiais é consideravelmente mais rápido quando comparados aos compósitos termofixos, pois os métodos de processamento consistem apenas nas etapas de aquecimento, modelagem e resfriamento, não incluindo longas etapas de cura. A segunda justificativa parte das propriedades particulares desses materiais, como exemplo uma alta resistência a delaminação. E por fim, são materiais que atendem as crescentes preocupações ambientais, devido a sua capacidade de fácil reciclagem e posterior reuso em conjunto com o fato de apresentarem baixíssima toxicidade (PETERS, 1998).

Os termoplásticos convencionais tem a característica de serem mais sensíveis a variações de temperatura de modo que existam limitações para as aplicações desses materiais. Para contornar isso, tornou-se comum o uso de termoplásticos avançados como o PEEK (CLYNE & HULL, 2019).

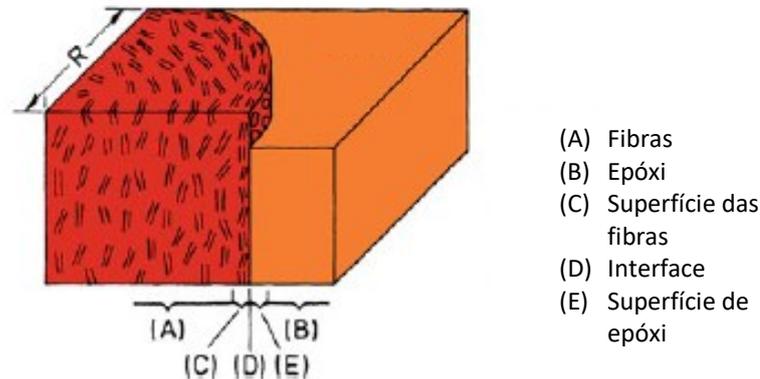
O compósito constituído por uma matriz em PEEK com reforço de fibras de carbono apresenta alta estabilidade estrutural quando utilizado em situações adversas de temperatura em conjunto com as já conhecidas e ótimas propriedades mecânicas, tornando-se assim um favorito na indústria aeroespacial (LAMÈTHE et al. 2005).

O processamento dos termoplásticos, embora rápido, pode ser mais complexo do que o processamento de termofixos. Como são polímeros já formados, os termoplásticos são materiais que apresentam alta viscosidade após o aquecimento e eventual fusão (no caso de polímeros semi-cristalinos). Essa viscosidade elevada pode dificultar a impregnação do polímero com as fibras de reforço, resultando na necessidade de etapas anteriores a modelagem final do compósito. No entanto, após devidamente impregnados, o compósito pode ser facilmente modelado utilizando-se de diversos métodos de processamento, por exemplo, modelagem por injeção (CLYNE & HULL, 2019).

3.1.2.3 Interface Fibra-Matriz

A região de interface, considerada como o terceiro componente de um compósito, é definida como a fronteira que une a fase de reforço com a matriz do material, sendo a principal fonte da adesão que ocorre entre as fases. Matematicamente representada como uma área bidimensional, a interface é, essencialmente, a região onde ocorre a transição gradual das propriedades mecânicas dos materiais que fazem parte do compósito, fazendo com que as propriedades da interface sejam tão cruciais quanto as próprias propriedades dos constituintes das matrizes e reforços. O comportamento mecânico do material final é consequência direta das características destes três componentes. Diversos mecanismos, sejam eles físicos, químicos ou mecânicos, podem provocar e influenciar diretamente a adesão entre fibras de reforço e matriz (CHAWLA, 2019).

Figura 8 - Representação da interface Carbono/Epóxi



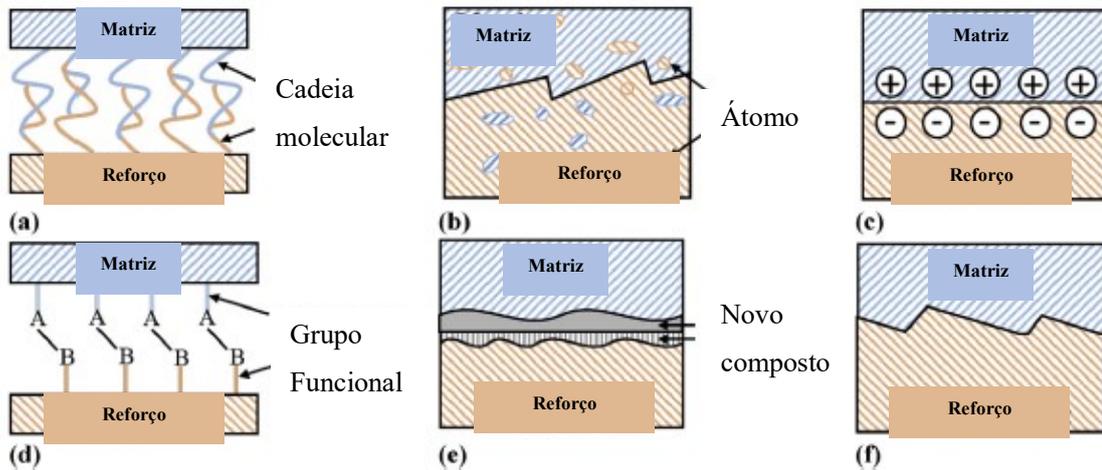
Fonte: Adaptado de Chawla, 2019

Huang et al resumem os principais mecanismos responsáveis pela formação da região de interface e a sequência em que ocorrem. Estes mecanismos incluem fenômenos de atração física entre corpos eletricamente neutros, entrelaçamento molecular, interdifusão, atração eletrostática, ligações químicas, ligações por reação e ligações mecânicas. Também são considerados como mecanismos de adesão ligações que de menor energia de ligação, como as forças de Van der Waals e as pontes de Hidrogênio. A simples aproximação das fases fibra e matriz já inicia mecanismos de atração física, como atração eletrostática. Após o contato, os mecanismos de entrelaçamento molecular e interdifusão entram em ação. Estes mecanismos estão demonstrados na figura 9. Acredita-se que a adesão final do compósito é decorrente da ação conjunta de todos os mecanismos que agem naquela região (HUANG et al. 2021).

Além dos mecanismos acima citados, características físicas dos materiais que constituem o compósito (molhabilidade e rugosidade) podem afetar as propriedades da interface. Molhabilidade, que é definida como a capacidade de um líquido manter-se em contato com uma superfície sólida, é uma propriedade fundamental para uma boa adesão pois garante a dispersão da matriz, quando ainda na fase líquida, sobre o material de reforço. É importante afirmar que a molhabilidade por si só não garante uma boa adesão, pois, esta propriedade descreve apenas a capacidade de contato físico entre dois materiais e não todas as outras interações e mecanismos que definem a adesão de uma interface (CHAWLA, 2019).

Wang et al demonstram que a molhabilidade é um fator determinante, pois possibilita uma melhor adesão física e uma considerável redução da existência de defeitos na região de interface (WANG et al, 2017).

Figura 9 - Mecanismos de adesão interfacial: (a) entrelaçamento molecular; (b) interdifusão; (c) atração eletrostática; (d) e (e) reações químicas; (f) ligações mecânicas;



Fonte: Adaptado de Huang et al, 2021

3.2 LAMINAÇÃO DE COMPÓSITOS

3.2.1 Laminação de Compósitos

Em função da natureza deste trabalho, serão detalhados os processos de laminação manual, que são os métodos mais simples aplicados no processamento de compósitos. Apesar de simples, são métodos muito eficientes se aplicados corretamente.

Atualmente existem muitos processos comerciais destinados a produção de compósitos de matriz polimérica. Mesmo sendo processos de diferentes abordagens, todos os métodos possuem os mesmos objetivos, que envolvem garantir (CLYNE & HULL, 2019):

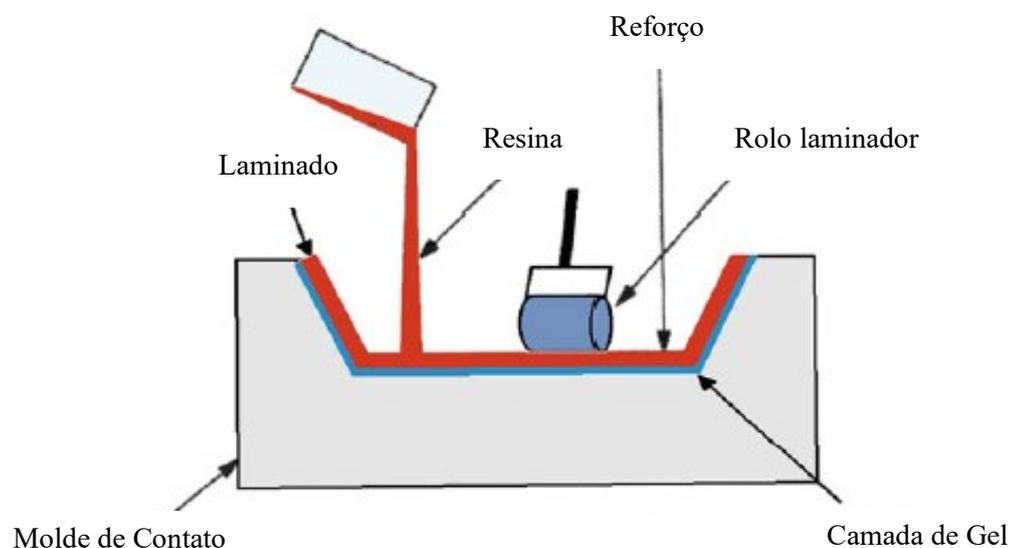
- A correta impregnação das fibras com a resina, proporcionando um material com estrutura mais homogênea;
- A distribuição balanceada das fibras na matriz polimérica;
- O correto alinhamento das fibras de acordo com a orientação desejada;

Com relação a compósitos de matriz termorrígida, por exemplo epóxi, outro fator considerado para a técnica de processamento é o tempo de cura. O processo de cura provoca o endurecimento do material por meio da formação de ligações cruzadas, mecanismo que é

acionado por agentes químicos adequados combinados a aplicação de energia térmica e mecânica (calor e pressão). Contudo, estes processos podem gerar defeitos no material que são provocados por gradientes térmicos e tensões residuais aliados ao problema dos longos tempos de cura (CHAWLA, 2019).

O método mais simples de laminação consiste na impregnação de resinas de baixa viscosidade sobre as fibras, que geralmente encontram-se na forma de tecidos (figura 10). Camadas deste tecido são empilhadas e revestidas com resina para que se obtenha a espessura desejada. Geralmente este processo ocorre sobre uma superfície plana ou molde aberto. A resina e o agente endurecedor são misturados imediatamente antes da aplicação e a cura é realizada a temperatura ambiente (CLYNE & HULL, 2019).

Figura 10 - Processo de laminação manual em molde aberto



Fonte: Adaptado de Chawla, 2019

Assim como todos os processos de fabricação, a laminação manual apresenta uma série de vantagens e desvantagens. Abaixo, algumas delas são citadas (PETERS, 1998):

Vantagens

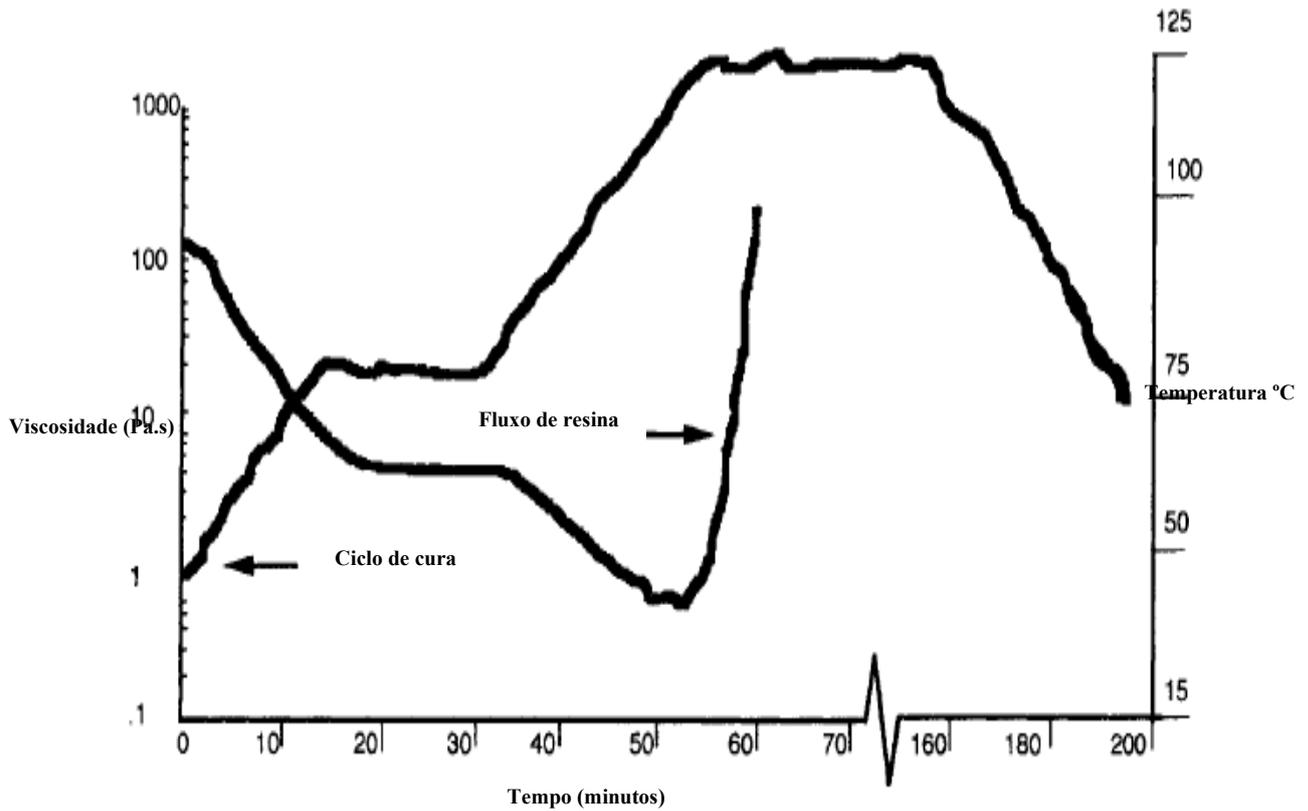
- Flexibilidade de *design* de projeto;
- Produção de peças grandes e complexas;
- Baixo investimento em ferramental;
- Alterações de *design* são relativamente simples;
- Possibilidade da construção de compósitos sanduíche;
- Permitem prototipagem;

Desvantagens

- Apenas uma superfície simples é obtida;
- Qualidade do material está diretamente relacionada a qualidade do processo;
- Produção de baixo volume;
- Atividade totalmente manual;
- Podem ocorrer perdas de material;
- Elevados tempos de cura;

Os elevados tempos de cura podem ser contornados ao se estudar o ciclo de cura das resinas empregadas no compósito, que considera as alterações de viscosidade decorrentes do aumento de temperatura. A análise detalhada desses ciclos permite o planejamento do processamento para que se otimize as características e propriedades do compósito ao mesmo tempo em que se reduz o tempo de processamento (PETERS, 1998). A figura 10 exemplifica um modelo de ciclo de cura aplicado a um processamento realizado em autoclave.

Figura 11 - Ciclo de cura de resina epóxi



Fonte: Adaptado de Peters, 1998

Um dos métodos mais utilizados para a laminação manual é o de laminação a vácuo, no qual o compósito é preparado sobre uma superfície, selado e o vácuo é aplicado ao material, gerando uma força de compressão que une as lâminas de tecido minimizando a probabilidade da ocorrência de defeitos e favorecendo os mecanismos de adesão e cura. Uma alternativa a esse método envolve a utilização de uma autoclave, para que a compressão sobre o material seja aumentada e a temperatura elevada facilitando a cura da resina. Um agente desmoldante é aplicado sobre a superfície de laminação para evitar a adesão da resina curada sobre o molde (PETERS, 1998).

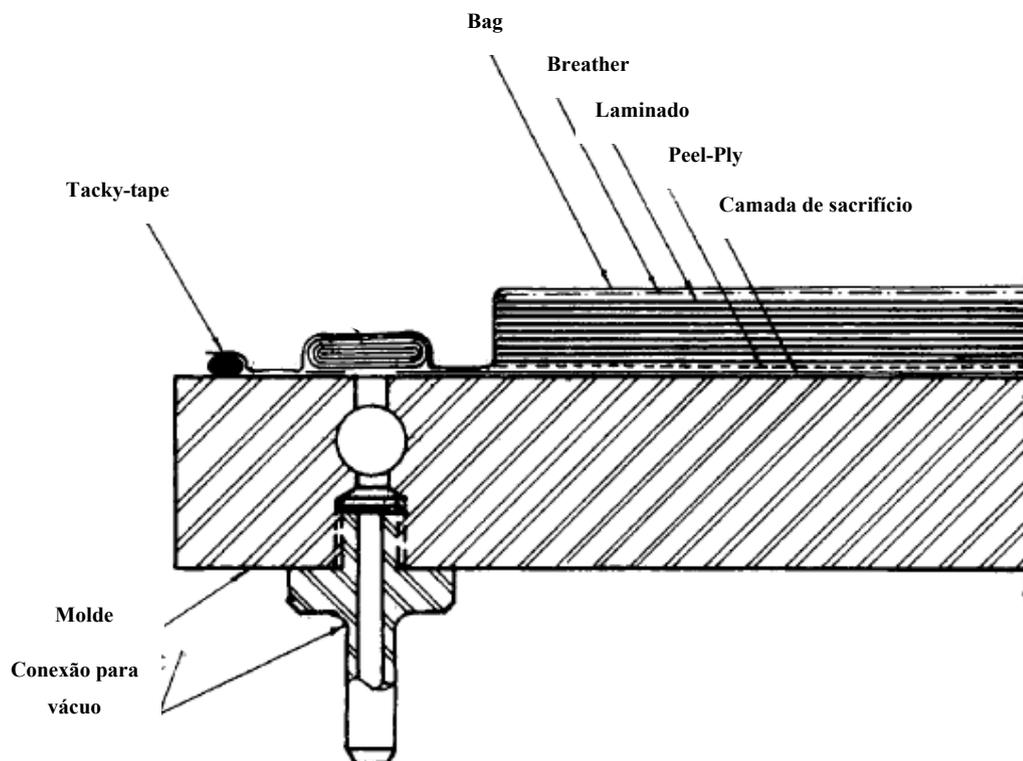
A preparação do material para este processamento envolve etapas pré-determinadas que são resumidas abaixo (PETERS, 1998).

- Preparação da superfície de laminação com agente desmoldante;
- Tecidos de proteção são aplicados seguindo a sequência: manta de proteção *Breather*, filme perfurado e tecido do tipo *Peel Ply*;

- As lâminas de tecido são empilhadas, impregnadas e comprimidas para que bolhas de ar sejam eliminadas até que se obtenha a espessura desejada;
- Os mesmos tecidos de proteção são utilizados para proteger a superfície do compósito;
- Um bag plástico é aplicado sobre o material e selado com fitas adesivas específicas;
- O vácuo é aplicado com o uso de bomba e o material levado a uma estufa ou autoclave para cura;

A figura 12 descreve em detalhes um modelo preparado para laminação a vácuo.

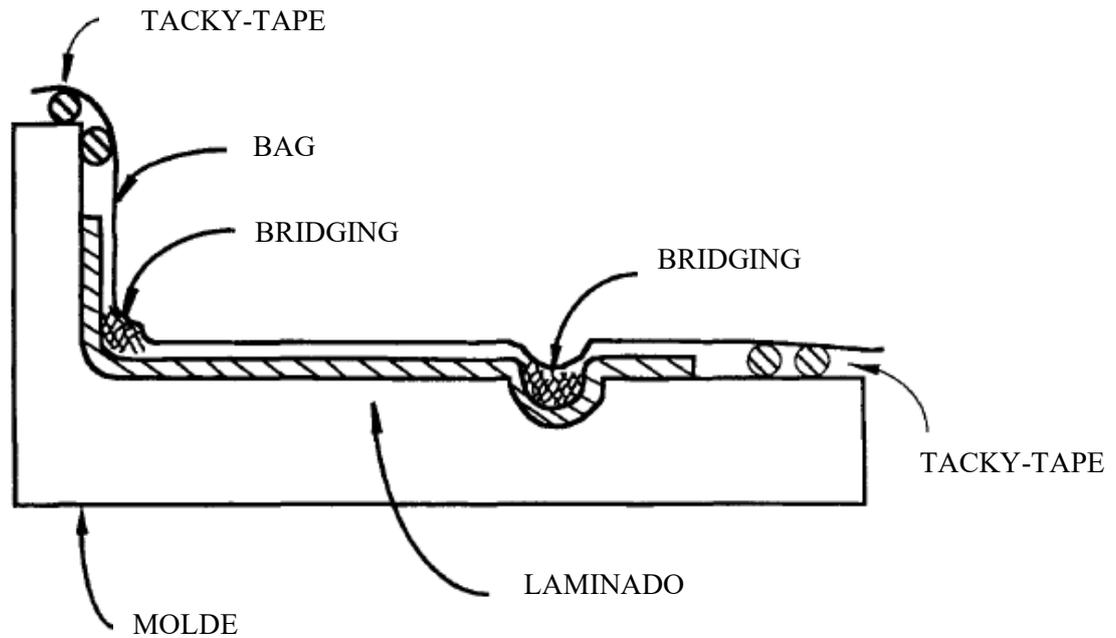
Figura 12 - Representação de laminação a vácuo



Fonte: Adaptado de Peters, 1998

A má colocação (*bridging*) ou perfuração do *bag* plástico para vácuo são as principais causas dos defeitos de pontos de concentração de resina e formação de vazios entre as lâminas (figura 13). Estes defeitos podem afetar consideravelmente a performance do material (PETERS, 1998).

Figura 13 - Exemplo de aplicação incorreta do bag de vácuo



Fonte: Adaptado de Peters, 1998

Essencialmente, a principal diferença entre os processos de laminação manual e laminação termomecânica está na forma como a compressão é realizada sobre o material durante a cura. Sabe-se que na laminação manual a compressão é realizada através da aplicação de vácuo em conjunto com a utilização de uma estufa ou autoclave para acelerar o processo de cura. Na laminação termomecânica, a compressão é realizada por uma prensa que pode ou não possuir uma ferramenta de aquecimento para favorecer a cura e possibilitar mais controle sobre o processo. Contudo, é importante entender possíveis fenômenos que podem ocorrer devido a processos que combinem elevadas forças de compressão e altas temperaturas (PETERS, 1998).

3.2.1 Considerações Sobre a Laminação Termomecânica de Compósitos

Hamdam et al. destacaram os principais defeitos e suas respectivas causas em processos de laminação termomecânica e que estes defeitos podem ser contornados com um controle rigoroso de processo. Em sua pesquisa, afirma que o defeito mais comum decorrente do processamento é a presença de vazios entre as camadas, em função da existência de ar entre as lâminas de tecido durante o processo de cura. Outros defeitos incluem delaminação, fibras desalinhadas e cura incompleta, que prejudicam as propriedades como resistência ao cisalhamento e módulo de elasticidade. Com relação a laminação termomecânica, reforçou que o controle da pressão de compressão é fundamental para a qualidade do compósito. No caso de a pressão ser insuficiente, a probabilidade da ocorrência de vazios aumenta, e se for excessiva, resina não curada pode ser expelida do compósito o que também favorece a formação de vazios e pontos de concentração de resina (HAMDAM et al, 2018).

Dai et al. estudaram o efeito da temperatura sobre as fibras de carbono, em especial sobre a adesão com uma matriz em epóxi. Foi demonstrado que um intervalo de temperatura relativamente alto (180 °C a 200 °C) afeta negativamente propriedades superficiais das fibras de carbono, mais especificamente a molhabilidade. Mas se esse intervalo for ultrapassado, ocorrem modificações na resina que compensam essa perda de molhabilidade, provando que as propriedades dos constituintes de um compósito apresentam uma interdependência (DAI et al, 2013).

Lessard et al. analisaram a interferência dos parâmetros de um processo de conformação termomecânica sobre um compósito laminado Carbono/PEEK. Foi constatado que a temperatura da ferramenta e a pressão de compressão promovem grande influência sobre as propriedades mecânicas e geométricas do material, especialmente na uniformidade da espessura da peça obtida. Observou-se que peças de espessura reduzida, por apresentarem maiores concentrações de fibra por unidade de volume, resultavam em maiores limites de resistência ao cisalhamento (LESSARD et al, 2015).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, serão abordados todos os tópicos relacionados a metodologia experimental empregada no desenvolvimento do trabalho. Estes tópicos englobam todas as etapas de dimensionamento, confecção e instrumentação dos corpos de prova, os procedimentos utilizados para os ensaios de tração e a metodologia aplicada ao tratamento dos dados experimentais para a obtenção das propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.

4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para a avaliação da influência dos parâmetros de processamento sobre as propriedades mecânicas do material, inicialmente, foi necessário definir um modelo de planejamento experimental. Com a finalidade de realizar a análise estatística, um Delineamento Fatorial de Ponto Central Composto foi selecionado. Esta metodologia foi escolhida pois sabe-se que os delineamentos centrais compostos representam análises eficientes, em que a partir da obtenção e tratamento de um baixo volume de dados, é possível obter conclusões confiáveis.

Os delineamentos fatoriais são eficientes para os estudos em que se deseja investigar os efeitos de dois ou mais fatores presentes em um experimento. Este modelo experimental garante que, a cada réplica ou teste completo do experimento, todas as combinações possíveis dos diversos níveis dos fatores investigados sejam consideradas na análise. O efeito de um fator é definido como uma alteração na resposta gerada em função de uma alteração no nível do fator sendo observado no experimento (MONTGOMERY, 2008).

Planejamentos fatoriais são amplamente utilizados em experimentos que requerem o estudo da combinação de “k” efeitos em determinada resposta. Estes fatores podem ser valores quantitativos, como temperatura, pressão ou tempo, ou qualitativos como operadores ou máquinas ou até mesmo a simples presença de um fator (MONTGOMERY, 2008).

A inclusão de pontos centrais no delineamento experimental tem a finalidade de reduzir a possibilidade de erros nos resultados encontrados, especialmente para os casos em que interações entre fatores são estudadas. Isto ocorre pois, para estes casos, a resposta do experimento deixa de indicar um comportamento linear, tornando-se uma superfície de resposta

3D. O ponto central indica uma condição para os fatores que será replicada “n” vezes durante o experimento (MONTGOMERY, 2008).

Com o modelo experimental selecionado, os fatores e parâmetros foram selecionados e o delineamento construído. Os parâmetros de processamento (pressão e temperatura) foram selecionados com base em valores comumente utilizados. Para este estudo, um modelo com 6 réplicas no ponto central foi gerado, no qual o número de ensaios foi determinado aplicando a regra $2^k + 2xk + m$, onde “k” representa o número de variáveis dependentes e “m” o número de réplicas no ponto central.

Os parâmetros e variáveis envolvidos no experimento foram:

I – Parâmetros Fixos

- Características geométricas do compósito
- Procedimento de pós-cura aplicado em todos os materiais
- Temperatura e tempo da pós-cura fixados em 50°C e 4h

II – Variáveis independentes

- Temperatura de cura
- Pressão de compressão da prensa

III – Variáveis dependentes

- Resistência Mecânica do material
- Módulo de Elasticidade

A aplicação do método com o auxílio do software *Statistica 13.2* e utilizando os dados citados acima, resultou nos parâmetros de processamento do material, assim como na sequência aleatória de ensaios a serem realizados. O planejamento compreende 14 ensaios com 14 réplicas, ou seja, uma réplica para cada corpo de prova produzido, deste modo totalizando 28 ensaios para levantamento de propriedades do material. Os corpos de prova com a denominação (C) ao lado do número indicam um material de ponto central, os pontos alto e baixo indicam valores superiores e inferiores ao ponto central e os pontos estrela indicam os limites máximo e mínimo calculados por meio da aplicação do modelo experimental.

O planejamento completo gerado, assim como os principais parâmetros de processamento, é descrito nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Parâmetros do Planejamento considerando todos os pontos

	Pontos				
	Estrela	Baixo	Central	Alto	Estrela
Pressão de Compressão [bar]	1,17	2,00	4,00	6,00	6,83
Temperatura[°C]	71,72	80,00	100,00	120,00	128,28

Fonte: Autor

Tabela 4 – Relação de Corpos de Prova com Parâmetros de Processamento

CDP	Réplica	Pressão	Temperatura
15	2	2,00	80,00
28 (C)	2	4,00	100,00
5	1	1,17	100,00
19	2	1,17	100,00
3	1	6,00	80,00
26 (C)	2	4,00	100,00
13 (C)	1	4,00	100,00
9 (C)	1	4,00	100,00
8	1	4,00	128,28
23 (C)	2	4,00	100,00
6	1	6,83	100,00
12 (C)	1	4,00	100,00
25 (C)	2	4,00	100,00
18	2	6,00	120,00
21	2	4,00	71,72
4	1	6,00	120,00
20	2	6,83	100,00
1	1	2,00	80,00
7	1	4,00	71,72
24 (C)	2	4,00	100,00
27 (C)	2	4,00	100,00
22	2	4,00	128,28
10 (C)	1	4,00	100,00
14 (C)	1	4,00	100,00
2	1	2,00	120,00
17	2	6,00	80,00
11 (C)	1	4,00	100,00
16	2	2,00	120,00

Fonte: Autor, 2021

4.2 MATERIAIS

4.2.1 Lista de materiais

A seguir, são relacionados todos os materiais e equipamentos utilizados durante a pesquisa. Todos os equipamentos estão disponíveis nos Laboratórios de Engenharia Mecânica e de Materiais.

Materiais:

1. Tecido de fibras de carbono bidirecional (0°/90°) RC200P (figura 14);
2. *Peel-Ply* (figura 15);
3. Filme perfurado WL3900 (figura 15);
4. *Breather* (figura 15);
5. Filme de vácuo WL100BB (figura 15);
6. *Tacky-Tape* – Fita adesiva utilizada para vácuo;
7. Resina Epóxi AR260 e Endurecedor AH260 (figura 16);

Equipamentos:

1. Estufa Fanem 320 (figura 18);
2. MTS 810 de 250kN (figura 28);
3. Flow MACH 2 (figura 24);
4. Spider 8 para leitura dos *strain gauges* (figura 28);
5. Prensa hidráulica BOVENAU P15ST (figura 21);
6. Extensômetros roseta tipo “T” (figura 26);
7. Dispositivos para ensaios de tração para a MTS 810;

Figura 14 - Tecido de Fibras de Carbono bidirecionais RC200P



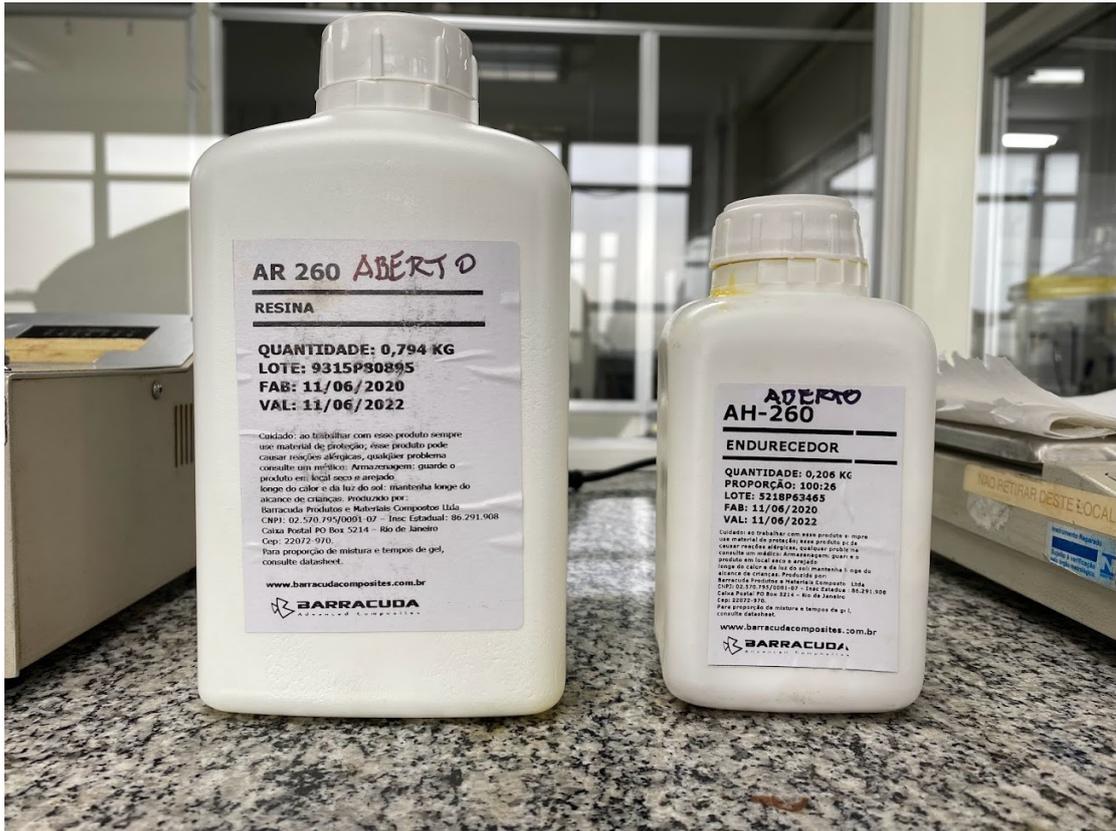
Fonte: Autor

Figura 15 - Materiais utilizados na preparação



Fonte: Autor

Figura 16 - Resina Epóxi AR260 e Endurecedor AH260



Fonte: Autor

Figura 17 - Bomba de vácuo



Fonte: Autor

Figura 18 - Estufa Fanem 320



Fonte: Autor

4.2.2 Preparação do Compósito Carbono/Epóxi

Lâminas do tecido de fibras bidirecional ($0^{\circ}/90^{\circ}$) e-composites RC200P (figura 14) foram recortadas e empilhadas de modo que a espessura desejada para os corpos de prova fosse atingida, seguindo as orientações especificadas nas normas referentes ao tipo de ensaio. A combinação da resina epóxi AR-260 com o endurecedor AH-260 (e-composites) formou a matriz termorrígida do material (figura 16).

Os corpos de prova foram dimensionados de acordo com as normas ASTM 3039/3039M para ensaios de tração (tabela 5).

Tabela 5 - Dimensões dos Corpos de Prova

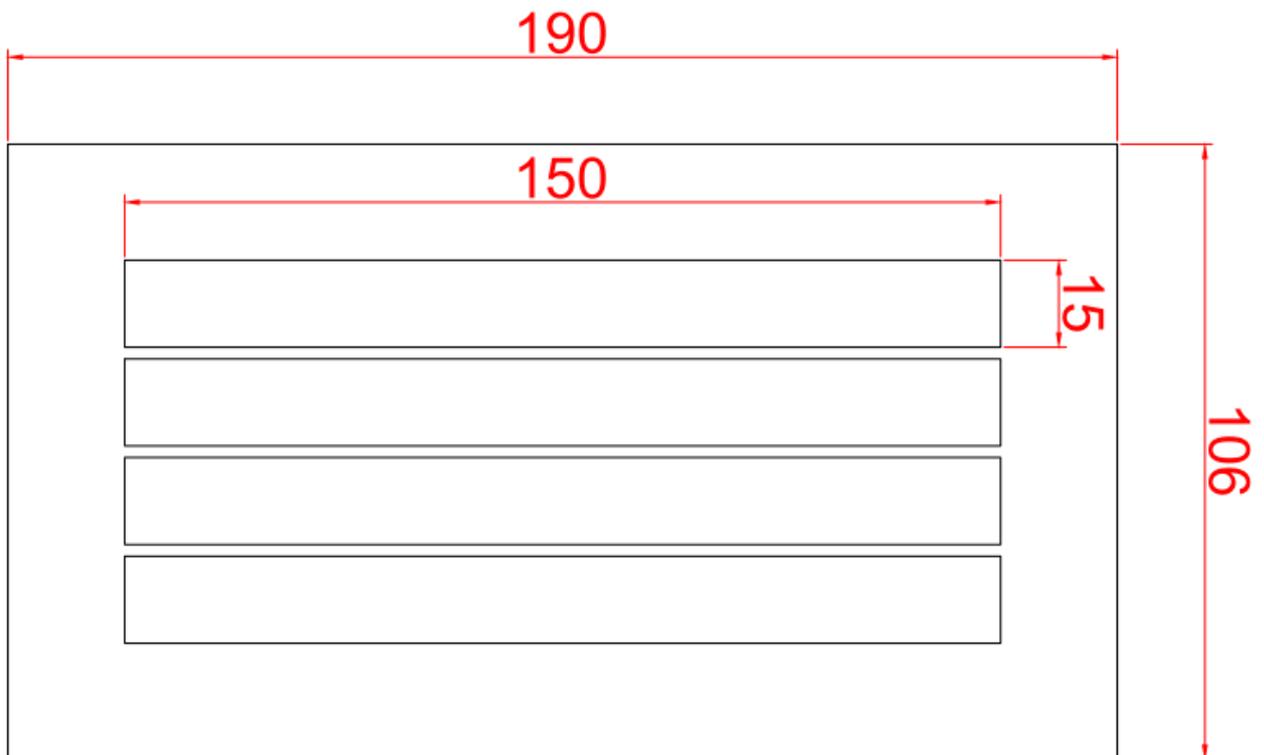
Ensaio	Norma	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]
Tração	ASTM D3039/3039M	150,0	15,0	1,5

Fonte: Autor

O compósito foi preparado na forma de placas retangulares com dimensões de (190 x 106 x 1,5) mm para os materiais destinados aos ensaios de tração (figura 19). De cada placa foi possível extrair 4 corpos de prova para cada ensaio, satisfazendo o planejamento experimental realizado para essa pesquisa, que considera um ensaio normal com uma réplica para cada placa. As dimensões também respeitaram uma área útil de processamento existente na prensa (200 x 200) mm. O espaço de entre os corpos de prova é de 2 mm, suficiente para a realização do corte.

Para a realização dos ensaios e caracterização das propriedades foram preparadas 14 placas do compósito, de acordo com as diferentes configurações de processamento, com duas placas para cada uma das condições de processamento totalizando 28 corpos de prova.

Figura 19 – Representação da placa com corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Autor

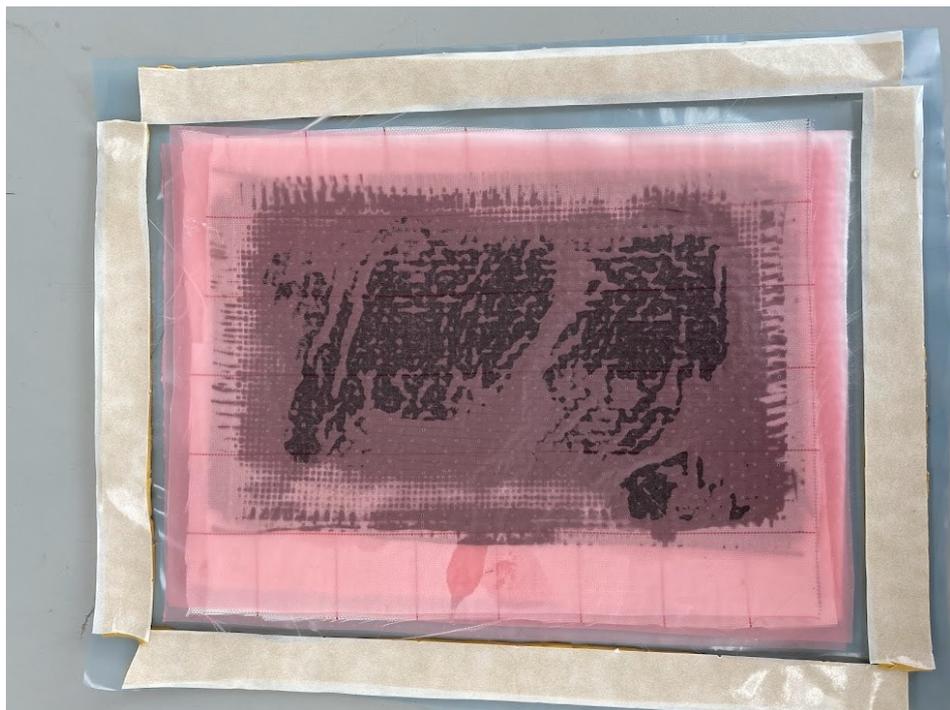
4.3 PROCESSAMENTO DO COMPÓSITO

4.3.1 Laminação Manual

Neste processo o empilhamento e impregnação das lâminas de tecido com resina epóxi foi realizado manualmente sobre uma placa de alumínio. Os diferentes filmes e tecidos (*Peel-Ply*, filme perfurado e *Breather*) utilizados para a proteção do compósito foram aplicados durante a montagem manual seguindo uma ordem específica, na sequência, 6 lâminas de fibra de carbono foram depositadas e revestidas pela mistura de resina epóxi com endurecedor até que a espessura desejada de 1,5 mm fosse atingida. Em seguida, o compósito foi selado sobre a placa de alumínio utilizando-se o filme de vácuo e a fita adesiva para vácuo *tacky-tape* como elemento de fixação (Figura 20).

A mistura de resina e endurecedor é feita de acordo com uma proporção em massa definida pelo fabricante, e, para o caso do material utilizado neste experimento, a mistura fora fixada em 79% em massa de resina para 21% em massa de endurecedor.

Figura 20 – Material laminado preparado para a etapa de cura



Fonte: Autor

O material foi submetido ao vácuo gerado por bomba (figura 17) e o conjunto completo será colocado em uma estufa Fanem 320 (figura 18), onde serão realizados os processos de cura e pós-cura. O processo de cura completa do compósito foi dividido em duas partes que são detalhadas na Tabela 6.

Vale ressaltar que este material foi preparado e ensaiado pelo autor seguindo os mesmos parâmetros de processamento, dimensões dos corpos de prova e configurações de ensaio, garantindo que a comparação entre resultados pudesse ser realizada.

Tabela 6 - Parâmetros de cura e pós-cura

	Temperatura	Tempo
Cura	80 °C	1 hora
Pós-cura	50 °C	4 horas

Fonte: Autor

4.3.2 Conformação Termomecânica

O processo de montagem do compósito, que compreende as etapas de laminação e impregnação com resina, foi idêntico ao método utilizado na laminação manual.

No entanto, o processamento do material foi realizado em uma prensa hidráulica (figura 21) que foi empregada para o processo de compressão e aquecimento com o objetivo de realizar as etapas de cura. Os parâmetros de pressão e temperatura são os mesmos definidos pelo planejamento experimental realizado, com exceção para a etapa de pós-cura que ocorreu em estufa com sua temperatura fixada em 50°C, mantendo o mesmo padrão da laminação manual.

As configurações de processamento das placas foram realizadas de acordo com o planejamento descrito na tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de processamento das placas

Placa	T [°C]	P [bar]
1	100,00	4,00
2	100,00	4,00
3	100,00	4,00
4	100,00	4,00
5	100,00	4,00
6	100,00	4,00
7	128.28	4,00
8	71.72	4,00
9	80,00	2,00
10	120,00	2,00
11	80,00	6,00
12	120,00	6,00
13	100,00	1.17
14	100,00	6.83

Fonte: Autor

Figura 21 - Prensa hidráulica BOVENAU P15ST



Fonte: Autor

A compressão foi aplicada por 1 hora na temperatura indicada no planejamento, e, após esse tempo o material foi transferido para a etapa de pós-cura realizada a 50°C por 4 horas em estufa

(figura 22). O material pronto foi mantido dentro do *bag* como forma de proteção e identificação (figura 23).

Figura 22 - Placas durante o processo de pós-cura



Fonte: Autor

Figura 23 – Material com processamento concluído



Fonte: Autor

4.4 INSTRUMENTAÇÃO E ENSAIOS

4.4.1 Corte e Instrumentação dos Corpos de Prova

Com as placas de compósito carbono epóxi finalizadas, os corpos de prova foram extraídos pelo método de corte a jato d'água, de modo a garantir a integridade estrutural dos mesmos. Sabe-se que o corte de compósitos carbono-epóxi com ferramentas de elevado atrito podem provocar efeitos indesejados, como delaminação, e este fato é agravado quando o material possui espessuras finas (o caso deste trabalho). Para a finalidade de corte dos corpos de prova, a máquina Flow MACH 2, disponível na oficina, foi utilizada (figura 24).

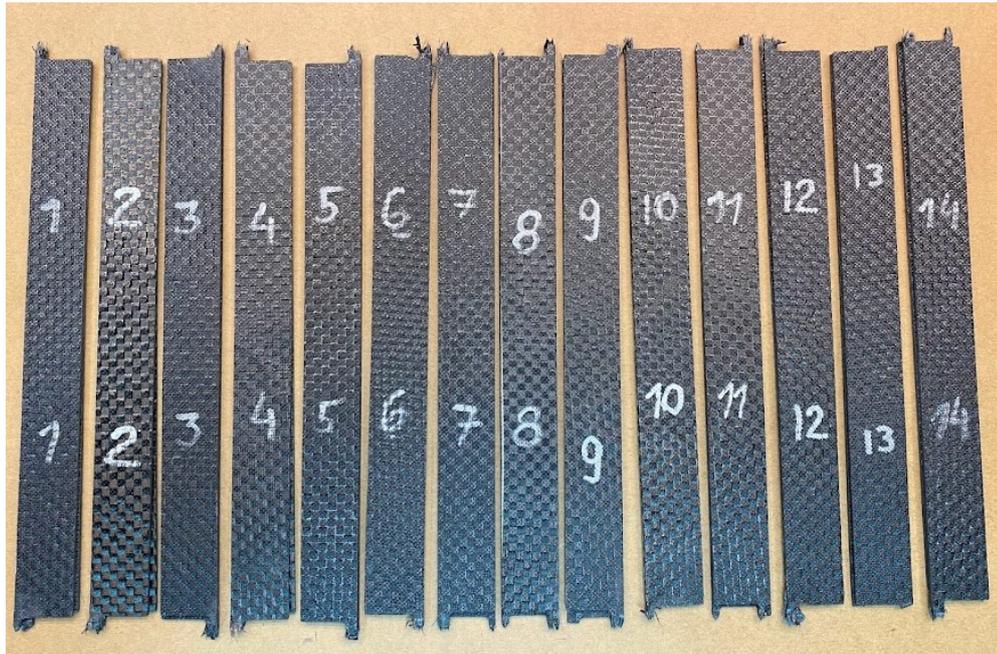
Figura 24 - Corte a jato d'água Flow MACH 2



Fonte: Autor

Após a etapa de corte, os corpos de prova foram devidamente identificados de acordo com a placa de onde foram extraídos, para garantir a associação dos materiais com os processamentos (figura 25).

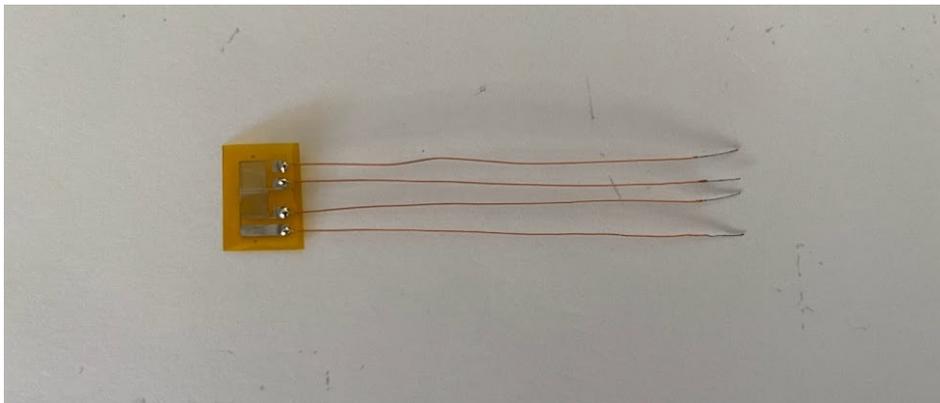
Figura 25 - Corpos de prova após o corte



Fonte: Autor

A norma ASTM D3039/3039M exige que os corpos de prova para ensaio de tração estejam devidamente instrumentados com *Strain Gauges* para a obtenção de valores de deformação mais precisos. Para esta finalidade, extensômetros PA-06-125TG-350-L, do tipo Roseta T foram utilizados. Estes extensômetros tem a capacidade de medir deformações em duas direções simultaneamente, a 0° e 90° (figura 26).

Figura 26 – Extensômetro PA-06-125TG-350-L

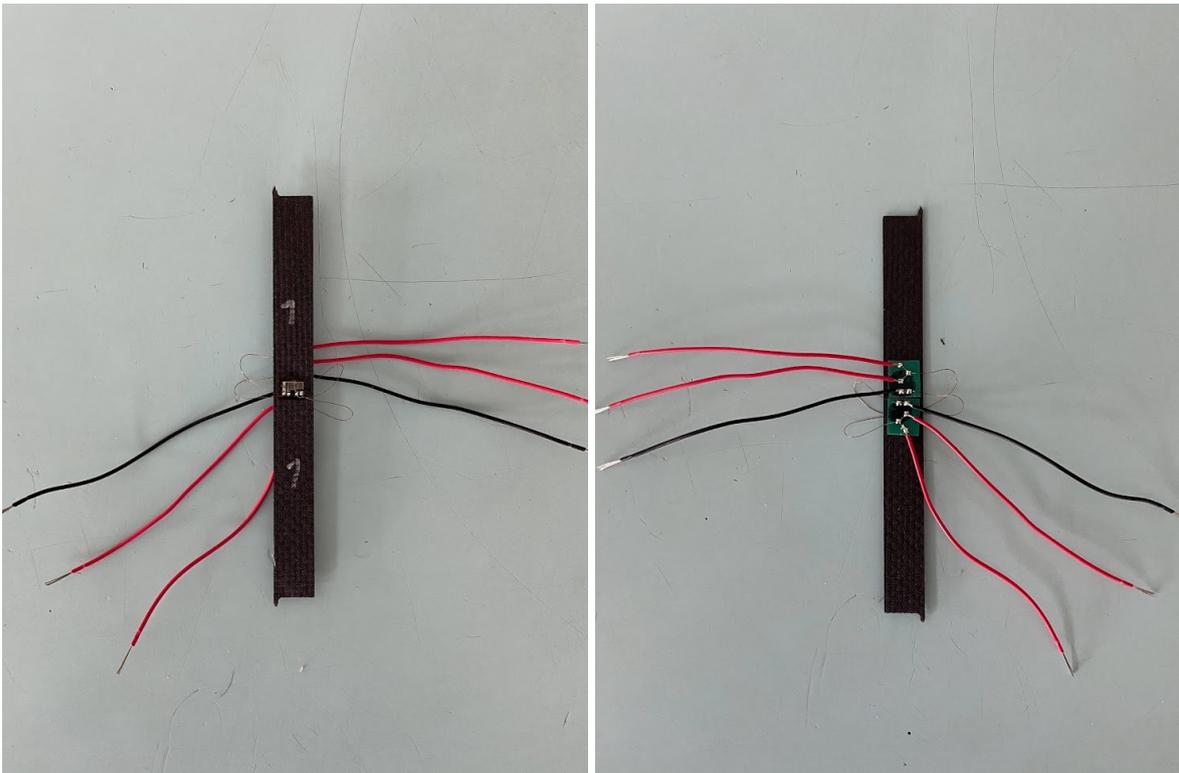


Fonte: Autor

Após a preparação adequada da superfície dos corpos de prova a colagem dos *strain gauges* é feita, e na sequência as ligações dos cabos e conexões aos terminais são realizadas. Essas conexões são necessárias para a ligação entre os extensômetros e o dispositivo que irá realizar a captura dos dados durante a realização do ensaio.

A figura 27 demonstra um corpo de prova finalizado e pronto para o ensaio de tração.

Figura 27 - Corpos de Prova finalizados

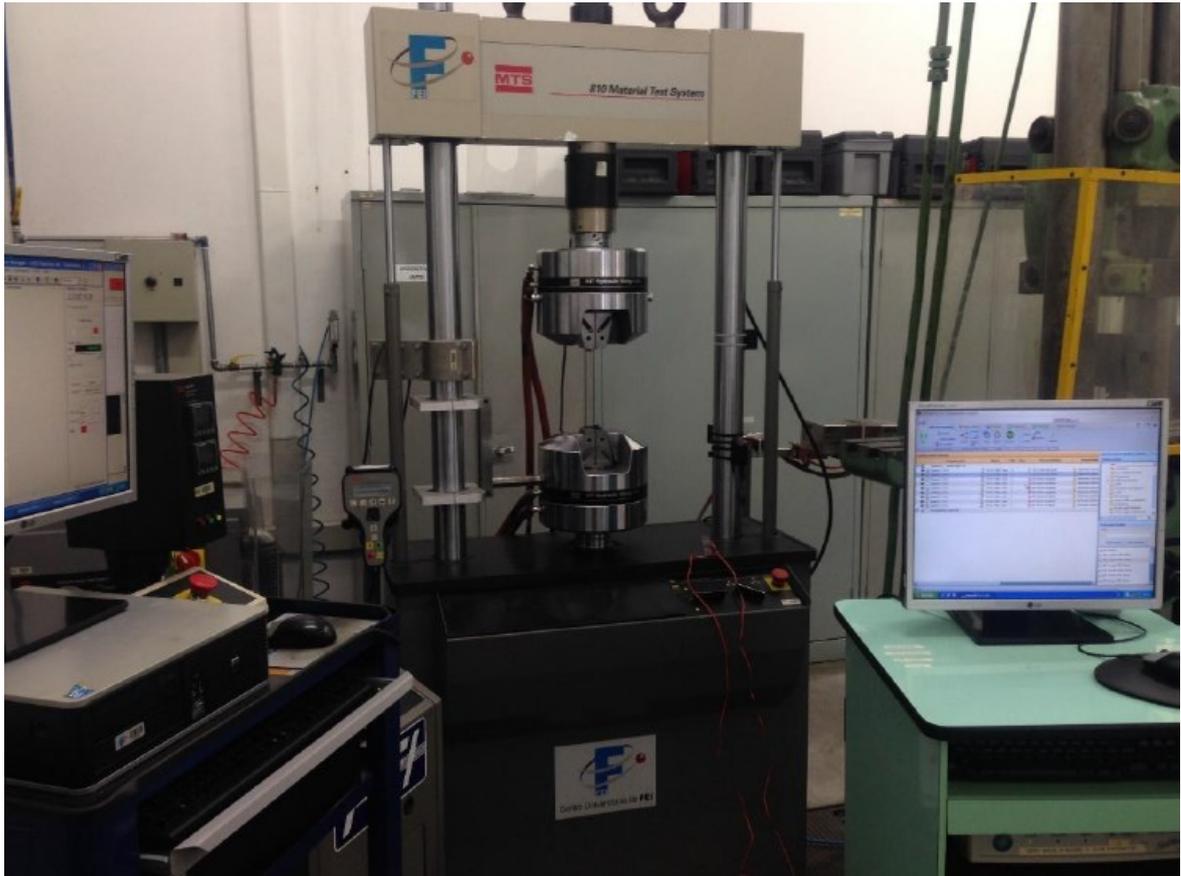


Fonte: Autor

4.4.2 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração, foram realizados em uma máquina universal de ensaios MTS 810 com capacidade de 250 kN e um dispositivo Spider 8 foi utilizado para a leitura dos dados gerados pelos extensômetros durante o ensaio (figura 28). Todos os ensaios foram realizados com as mesmas configurações de máquina e deslocamento constante de 5 mm/min, para garantir a integridade dos dados levantados.

Figura 28 - MTS 810 e Spider 8

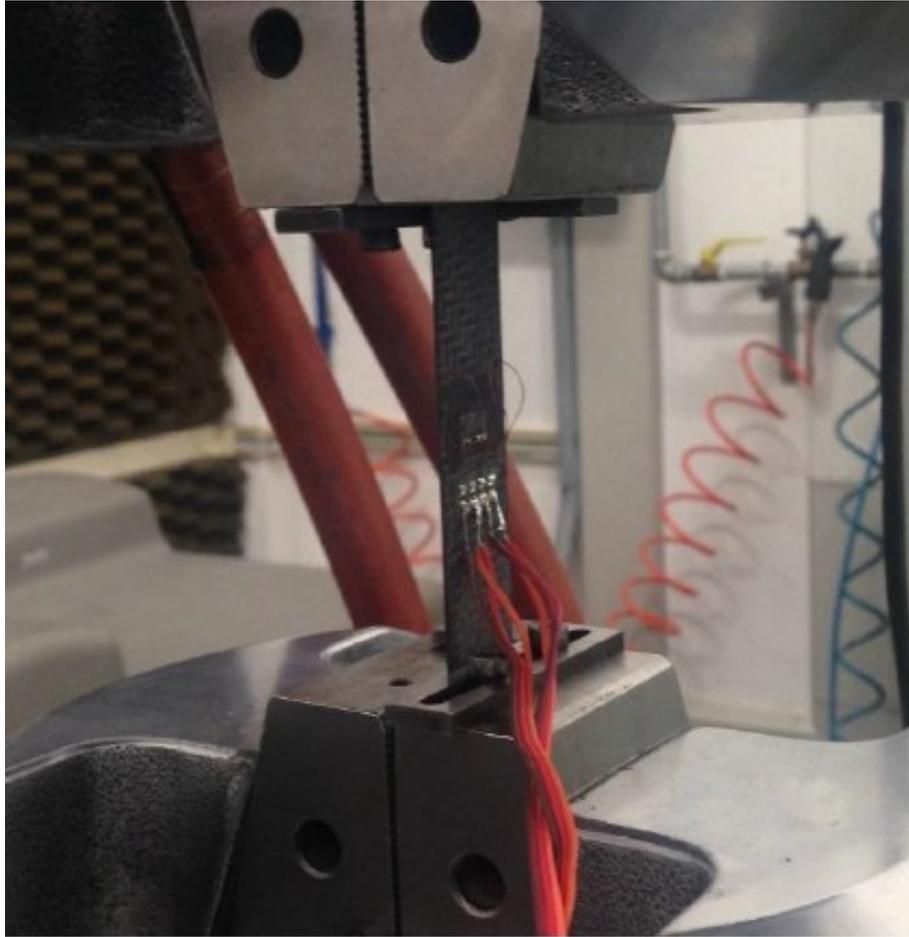


Fonte: Autor

De acordo com a norma ASTM 3039/3039M e em função das dimensões dos corpos de prova, não se fez necessária a aplicação de *tabs* metálicos para auxiliar a fixação realizada pelas garras da máquina. Também de acordo com a norma, a velocidade de ensaio foi definida em função do deslocamento do cabeçote da máquina, sendo fixada em 2 mm/min.

A figura 29 demonstra um corpo de prova devidamente instrumentado e instalado na máquina para a execução do ensaio.

Figura 29 - Corpo de prova preparado para ensaio de tração



Fonte: Autor

Os dados gerados neste ensaio permitiram o levantamento das curvas Tensão x Deformação do material, possibilitando a obtenção das propriedades de tensão limite de resistência mecânica, tensão de ruptura e módulo de elasticidade, que caracterizam seu comportamento quando submetido aos esforços de tração.

Todos os ensaios foram realizados seguindo a sequência randômica indicada no planejamento experimental.

Para garantir a integridade dos ensaios realizados, antes do início da sequência foram realizados dois ensaios em corpos de prova de sacrifício de modo a garantir que todos os parâmetros da máquina estivessem corretos.

4.4.3 Determinação das Propriedades à Tração

Os ensaios de tração forneceram dados que foram utilizados para o levantamento das curvas tensão x deformação por meio a aplicação da equação 1. A partir da análise das curvas tensão x deformação reais e com a aplicação das equações que descrevem o comportamento mecânico do material, foi possível determinar o Módulo de Elasticidade (E) do material e sua Tensão Limite de Resistência (σ_{LR}) e a Tensão de Fratura (σ_F).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Os extensômetros instalados nos corpos de prova efetuaram as medições das variações dimensionais nos sentidos transversal (ε_t) e longitudinal (ε_l) ao longo do ensaio de tração, de modo a determinar o coeficiente de Poisson do material (ν) pela aplicação da equação 2.

$$\nu = \left(\frac{-\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \right) \quad (2)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 LEVANTAMENTO DAS CURVAS TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Após a realização dos ensaios, o primeiro passo realizado foi o tratamento e análise dos dados obtidos. Observou-se que todos os ensaios foram validados, isto é, não ocorreram incidentes que, de acordo com a norma, invalidariam o ensaio. Entre esses incidentes podem ser citados, a não fratura do corpo de prova e fratura na região das garras da máquina.

Com a finalidade de organizar os ensaios, foram criadas categorias em função dos parâmetros de processamento. Estas categorias estão descritas na tabela 8. O caractere © indica o parâmetro relacionado ao ponto central.

Tabela 8 - Classificação dos materiais em função do processamento

Processamento	Parâmetros	CDP's	Placa
P.1	1,17 bar x 100 °C	5 e 19	Placa 13
P.2	2,00 bar x 80 °C	1 e 15	Placa 9
P.3	2,00 bar x 120 °C	2 e 16	Placa 10
P.4	4,00 bar x 71,72 °C	7 e 21	Placa 8
P.5 ©	4,00 bar x 100 °C	9, 10, 11, 12, 13, 14, 23, 24, 25, 26, 27, 28	Placas 1 a 6
P.6	4,00 bar x 128,28 °C	8 e 22	Placa 7
P.7	6,00 bar x 80 °C	3 e 17	Placa 11
P.8	6,00 bar x 120 °C	4 e 18	Placa 12
P.9	6,83 bar x 100 °C	6 e 20	Placa 14

Fonte: Autor

Com os dados dos experimentos em mãos, as curvas Tensão x Deformação foram construídas (figuras 30 a 43). Estes gráficos estão divididos em função dos tratamentos e cada um contém duas curvas, sendo que uma representa o corpo de prova principal e a outra representa a réplica.

As curvas de P.5 representam os materiais processados utilizando os parâmetros do Ponto Central, as demais representam os parâmetros alto, baixo e estrela.

Os valores indicados nas curvas representam a tensão limite de resistência.

A análise preliminar das curvas desenhadas possibilitou a observação de alguns pontos relevantes.

Todos os materiais processados de acordo com os parâmetros de ponto central, representados pelas curvas P.5, indicam que o processamento apresenta consistência, isto é, os resultados obtidos indicam valores próximos e o comportamento das curvas é semelhante (figura 30).

Nestas curvas, a consistência é evidenciada pela proximidade entre as curvas dos corpos de prova principais com suas réplicas, ocorrendo apenas um desvio desse comportamento no material da placa 4 (figura 33).

Para os materiais processados pelos parâmetros de ponto central, a maior tensão de resistência mecânica encontrada foi de 1078 MPa, que ocorreu no CDP 28 R da placa 1 (figura 30), enquanto que o menor valor foi encontrado no CDP 09 da placa 2, sendo este de 840 MPa (figura 31).

A curva P.3, representando um processamento de baixa pressão e alta temperatura (2 bar x 120°C), indicou comportamentos inferiores para o material quando comparado a outras amostras. Tendo a tensão de 872 MPa como maior valor e sua réplica falhando a apenas 641 MPa podem ser indicativos de que este processamento possa resultar em materiais de performance inferior. Mas vale ressaltar que várias etapas da preparação do compósito ainda são manuais e esse fator pode também ser uma possível fonte de erro.

Ao analisar os gráficos para encontrar valores extremos observa-se uma tensão máxima atingida no CDP 03 da curva P.7, com um valor significativo de 1151 MPa. Curiosamente para essa mesma placa o CDP 17, uma réplica, apresentou um comportamento irregular na fratura. A queda indicada pela curva possivelmente demonstra uma falha da matriz ou outro tipo de falha relacionado as fibras. Após essa ruptura inicial os valores de tensão mostraram uma leve tendência de aumento, o que pode ser um indicativo da resistência das fibras de reforço (figura 41).

As curvas P.6 e P.9 também indicam uma possível falha da matriz ou das fibras, porém por menos tempo de ensaio ao compararmos com o material P.7.

Figura 30 - Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 1

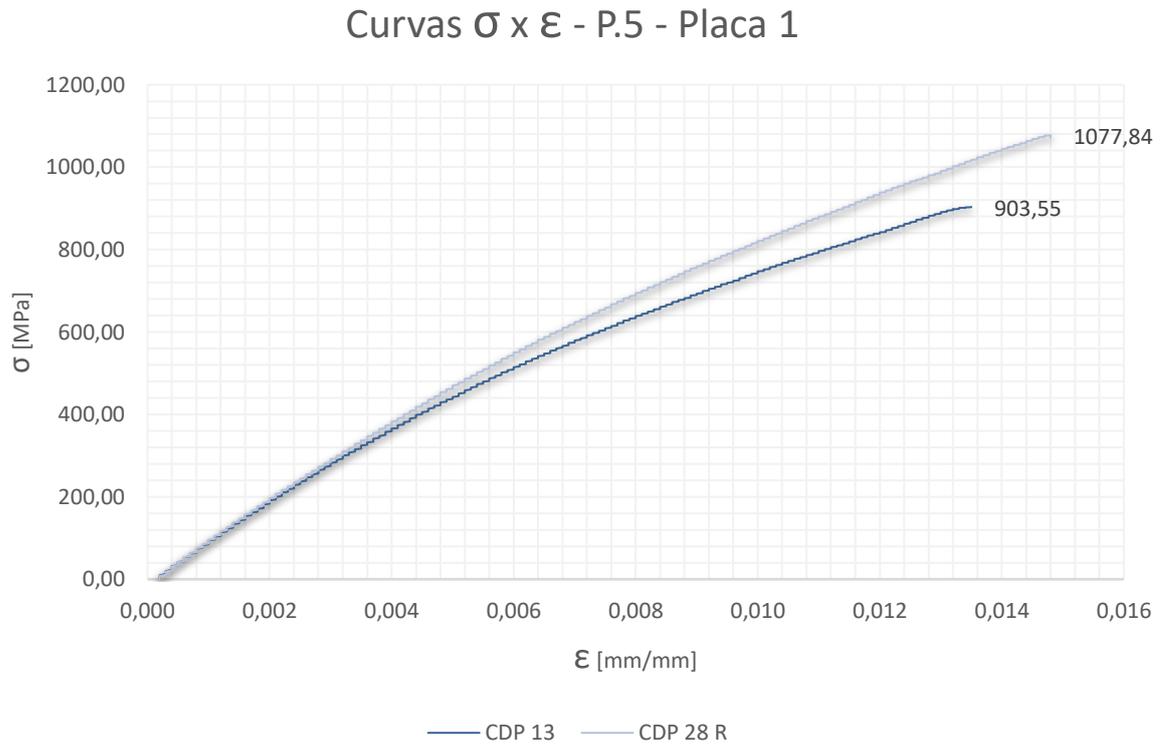
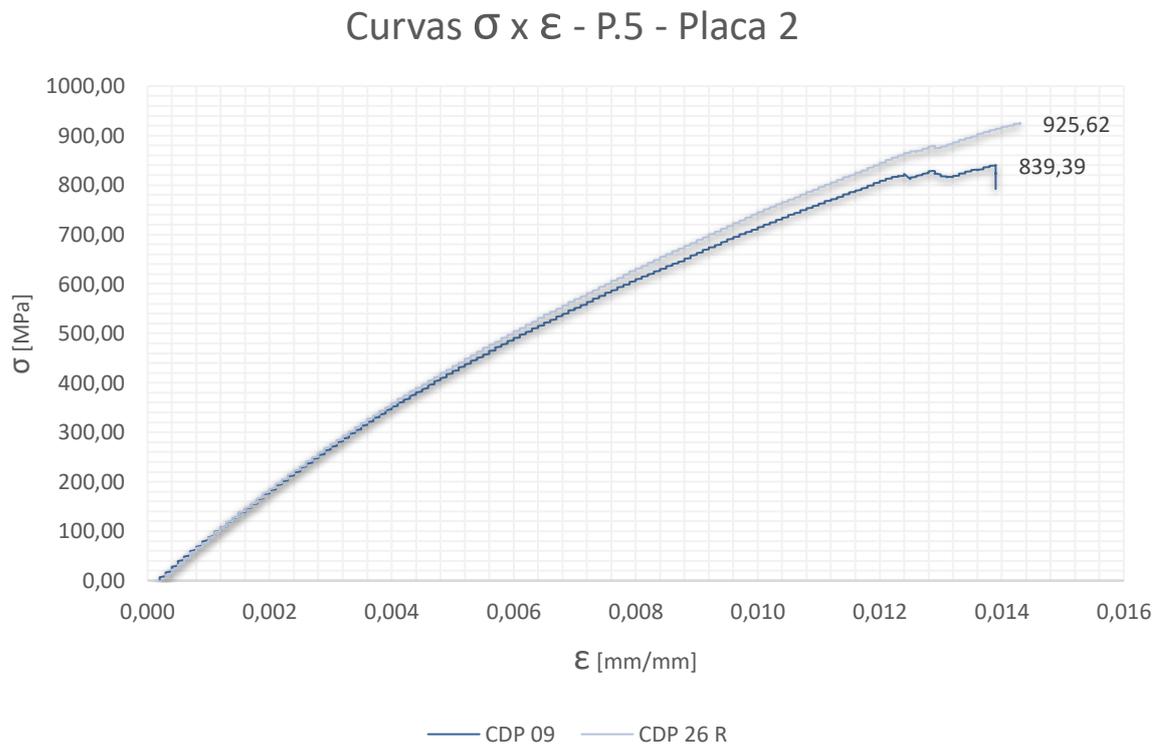


Figura 31 - Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 2



Fonte: Autor

Figura 32 - Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 3

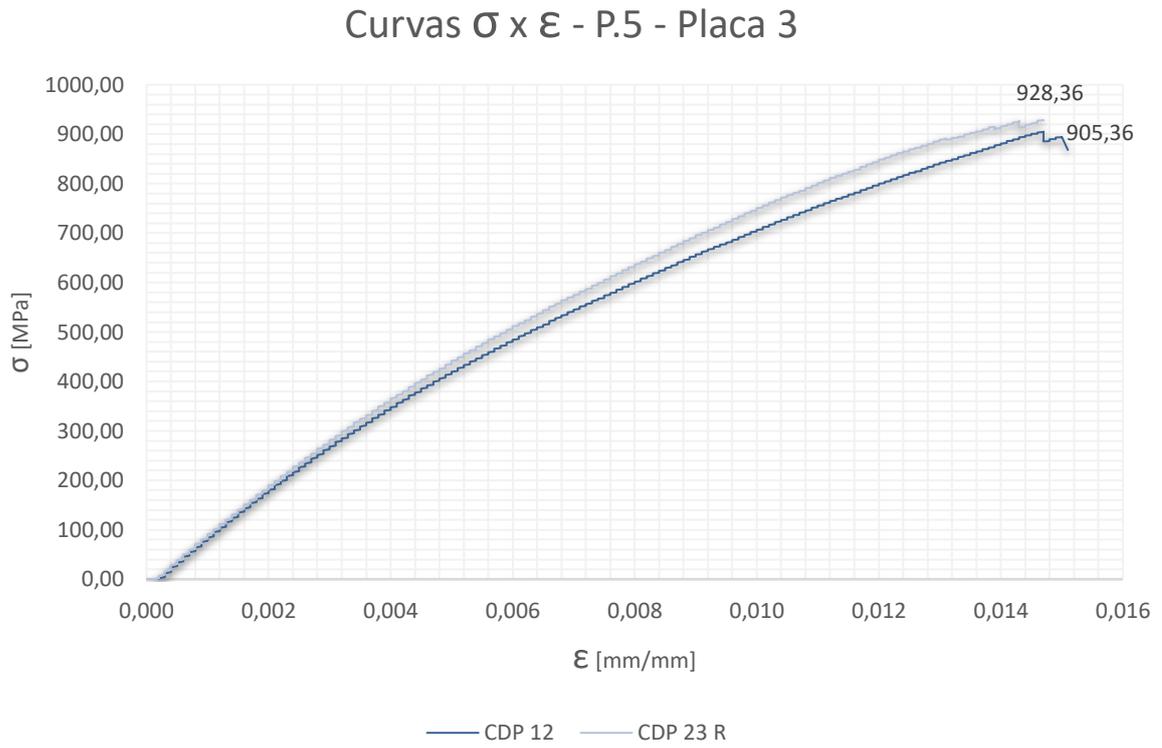
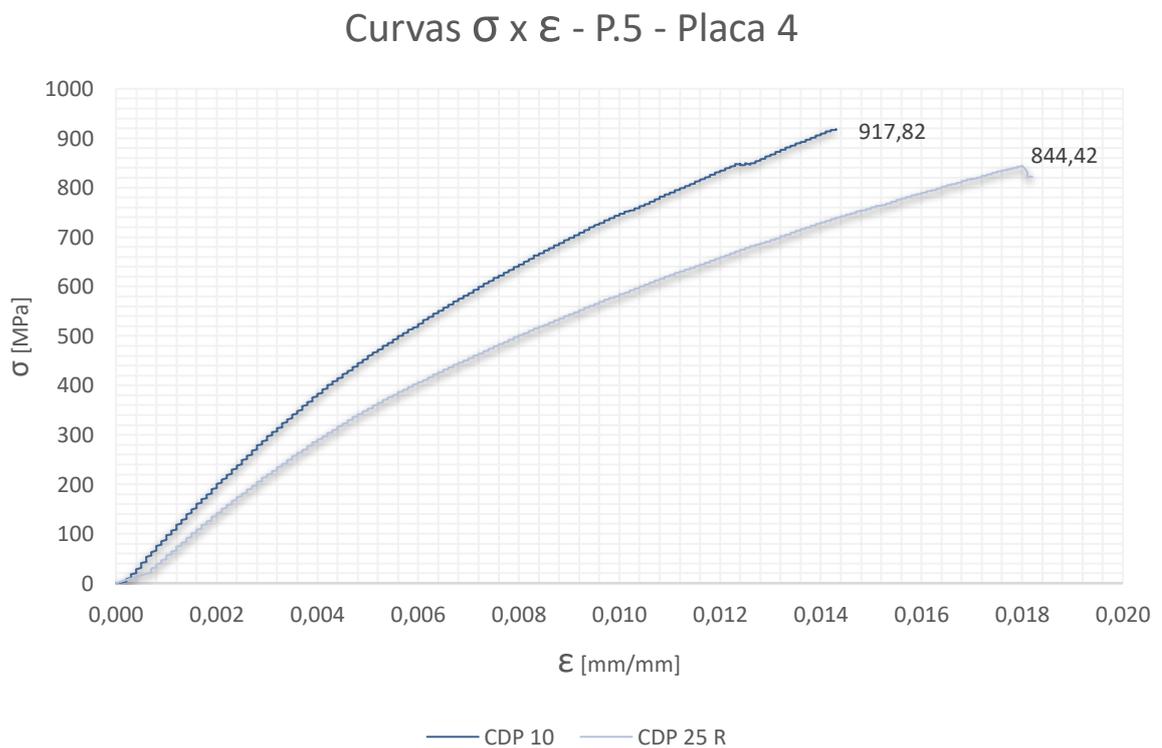


Figura 33 - Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 4



Fonte: Autor

Figura 34 - Curva Tensão x Deformação P.5 – Placa 5

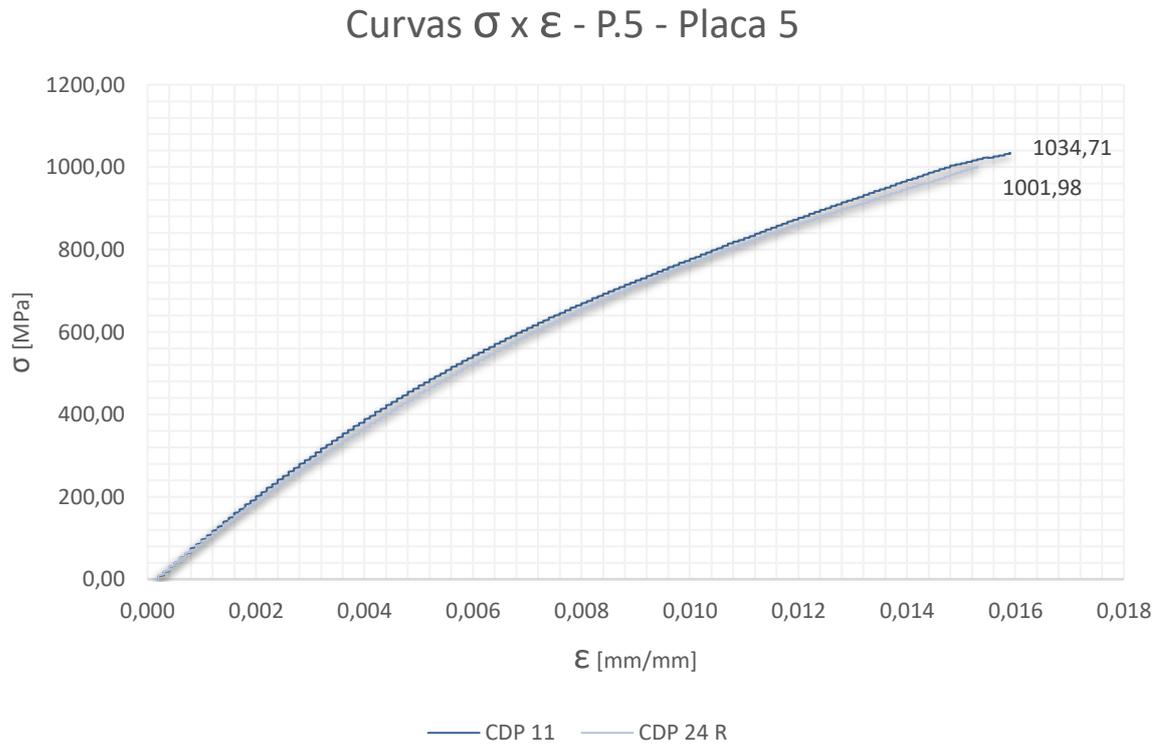
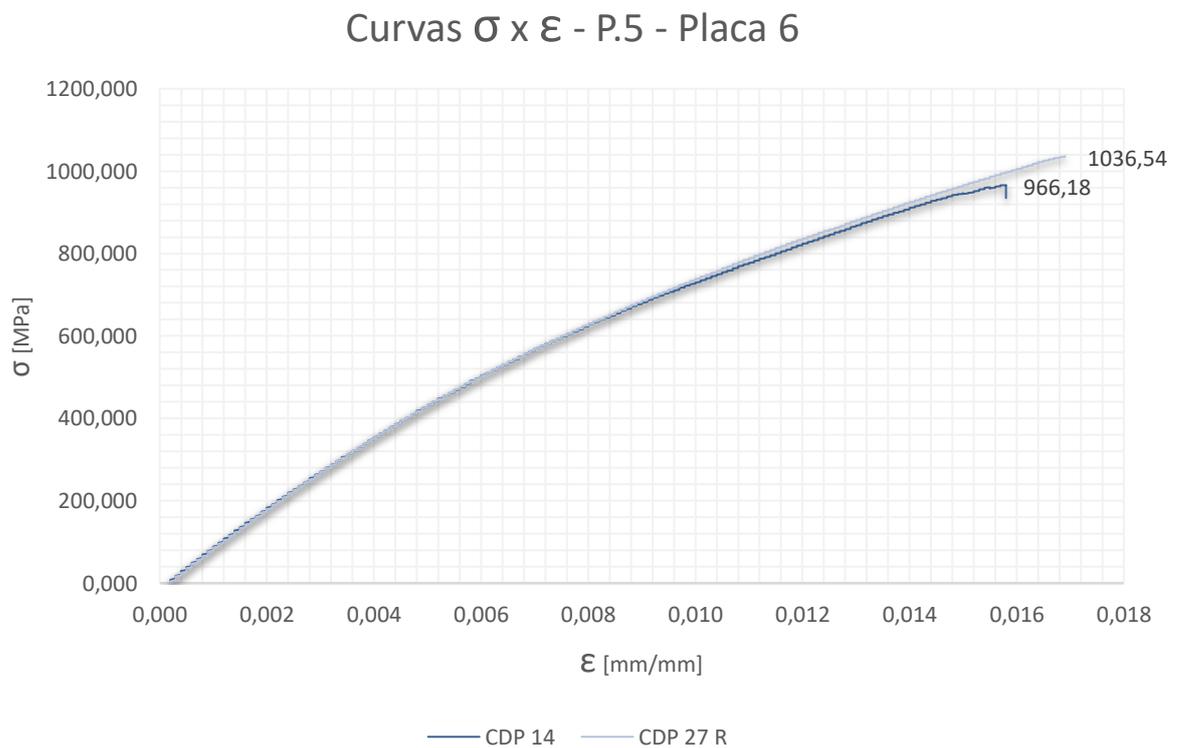


Figura 35 - Curva Tensão x Deformação P.6 – Placa 6



Fonte: Autor

Figura 36 - Curva Tensão x Deformação P.1

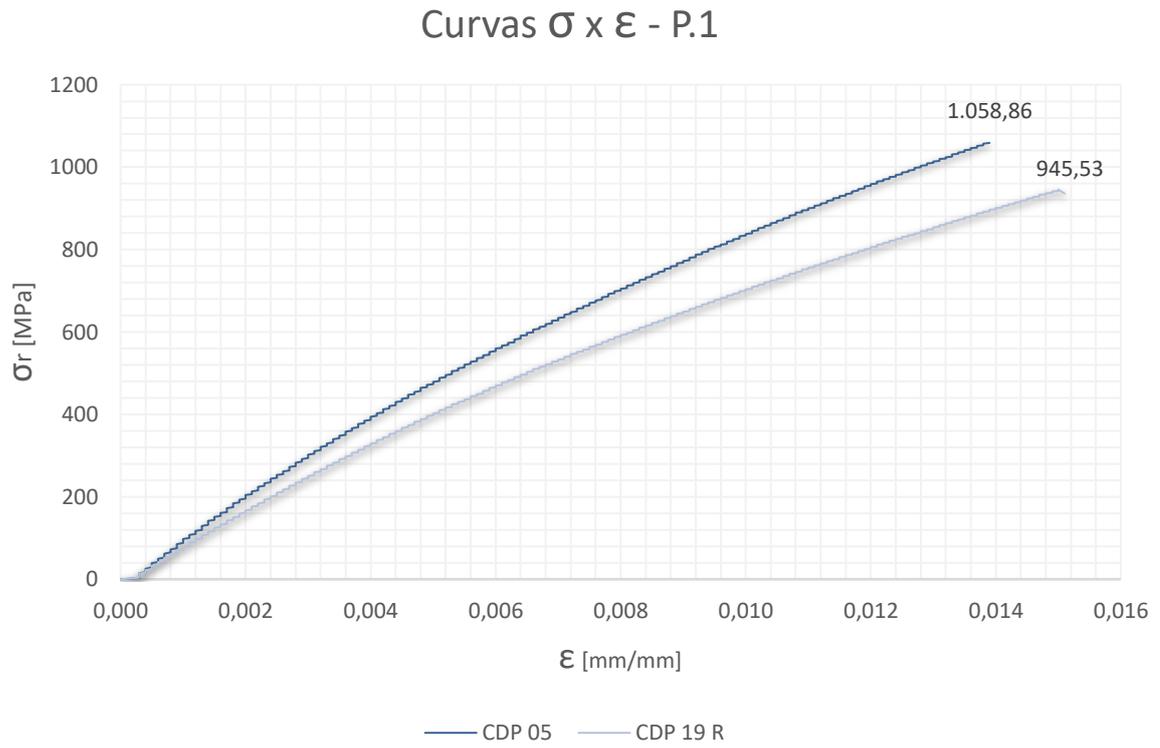
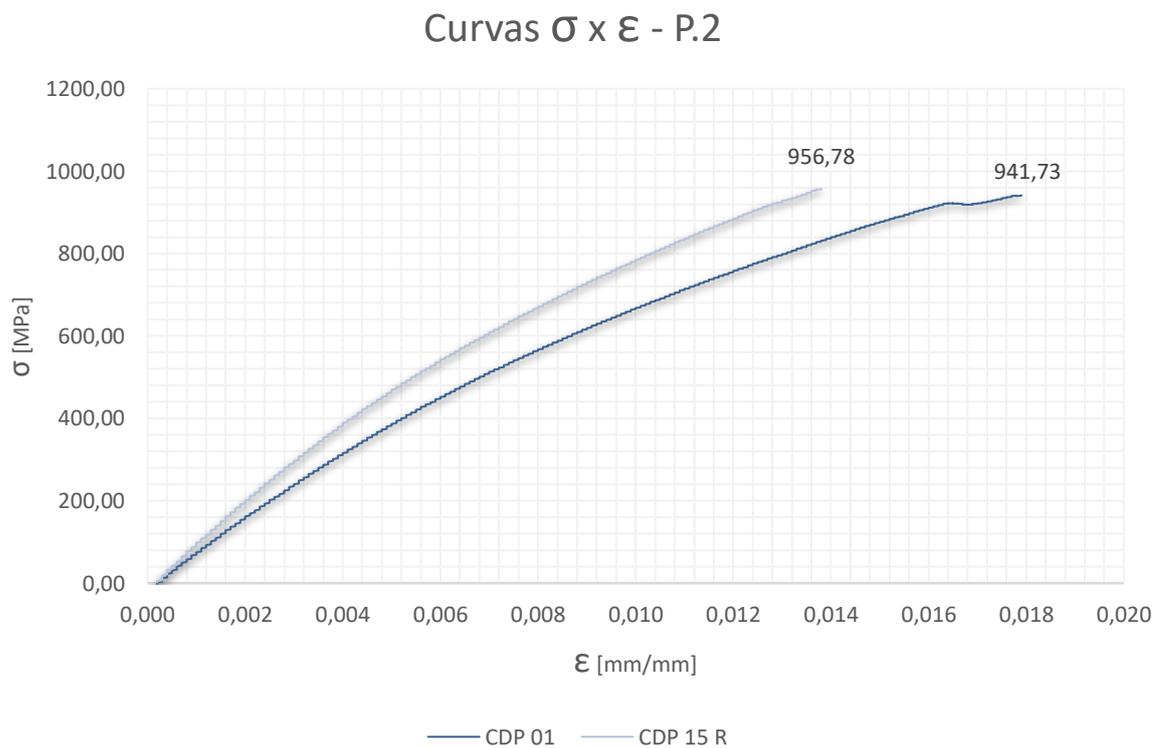


Figura 37 - Curva Tensão x Deformação P.2



Fonte: Autor

Figura 38 - Curva Tensão x Deformação P.3

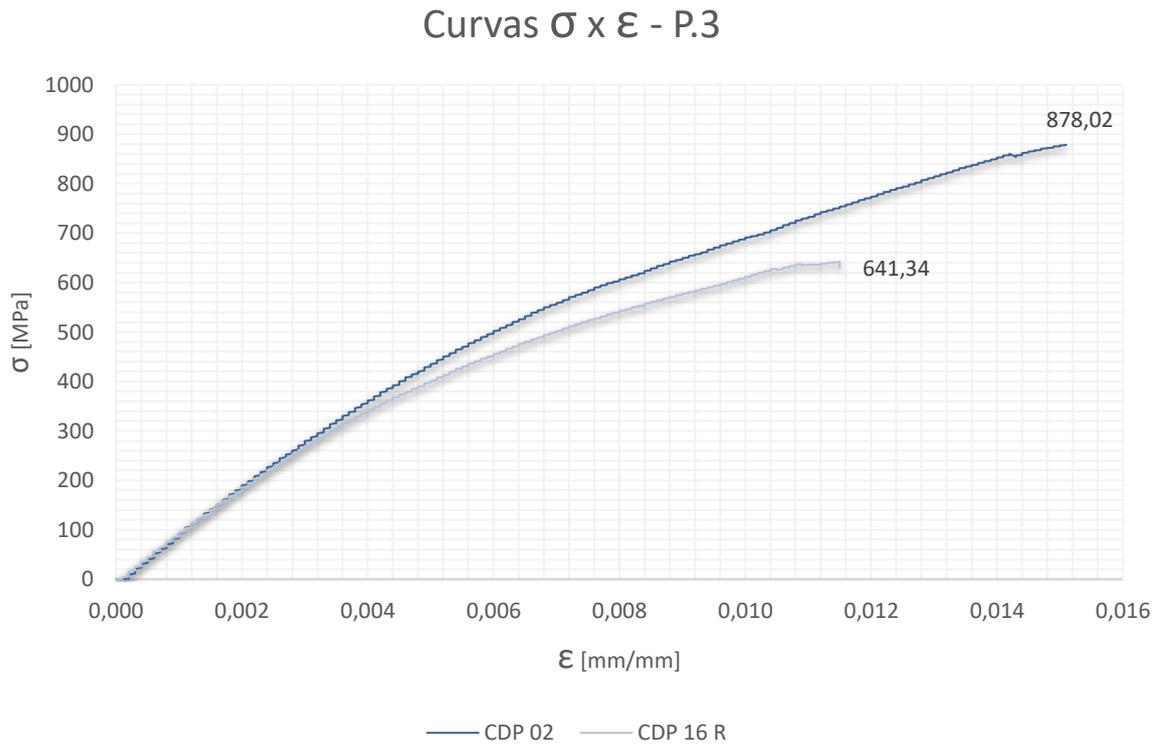
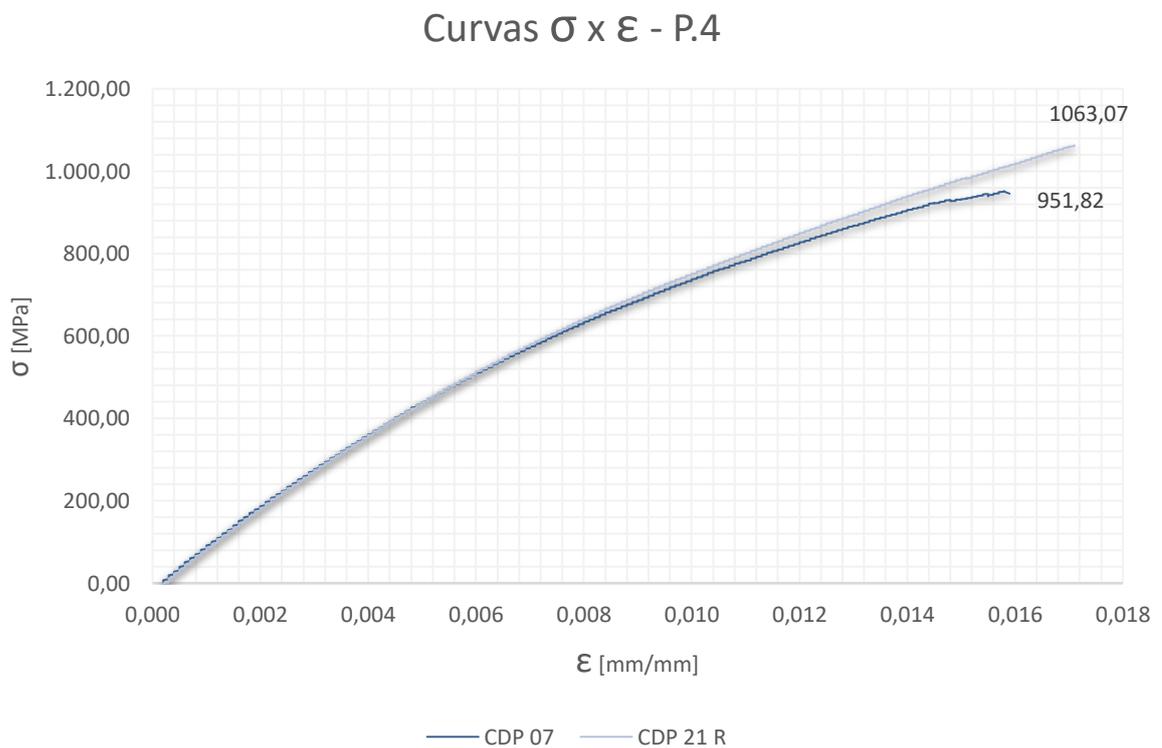


Figura 39 - Curva Tensão x Deformação P.4



Fonte: Autor

Figura 40 - Curva Tensão x Deformação P.6

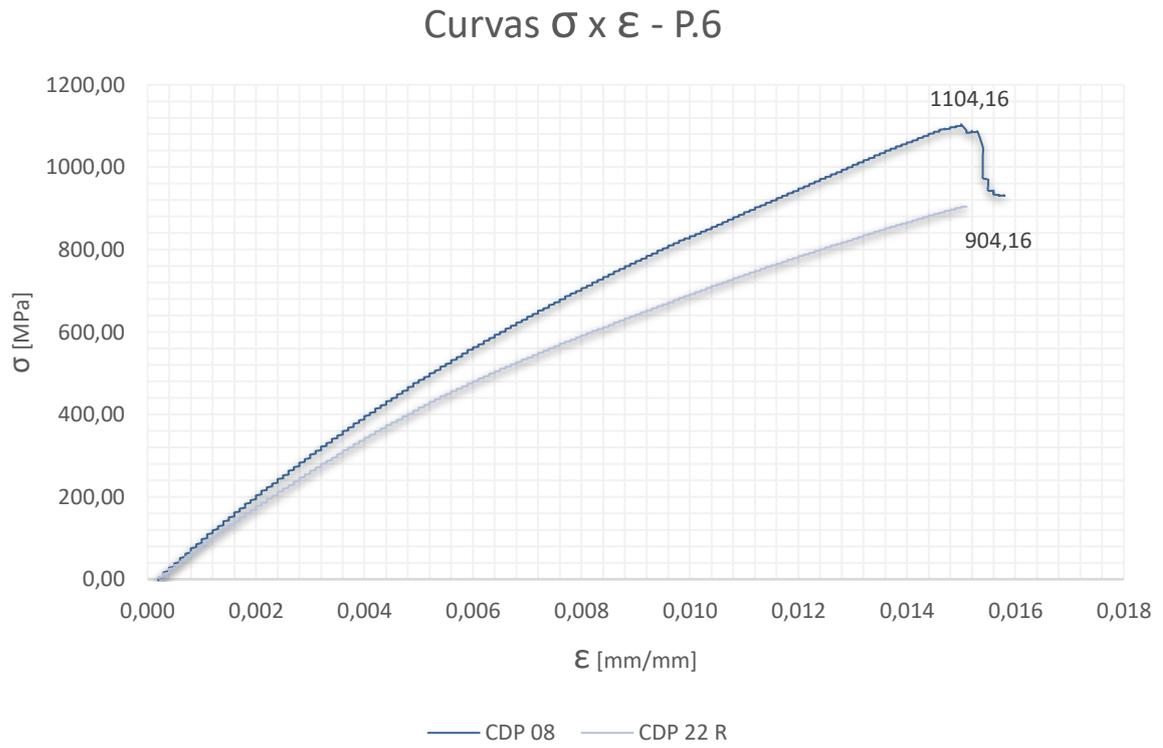
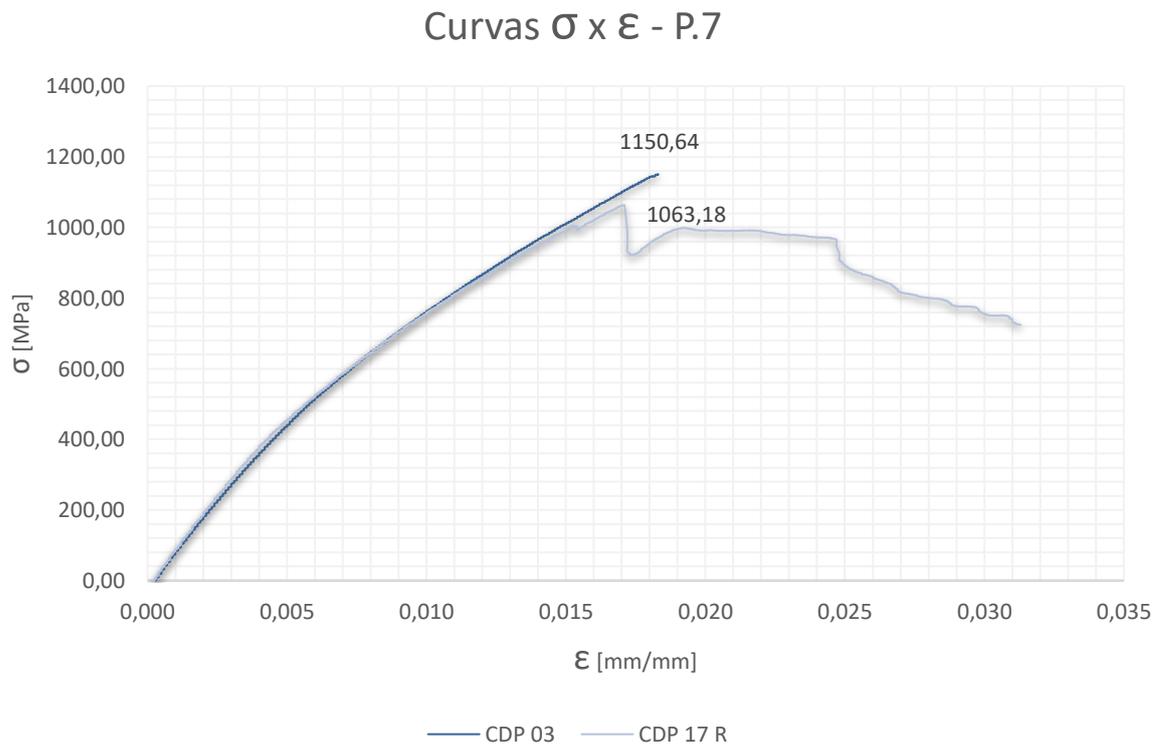


Figura 41 - Curva Tensão x Deformação P.7



Fonte: Autor

Figura 42 - Curva Tensão x Deformação P.8

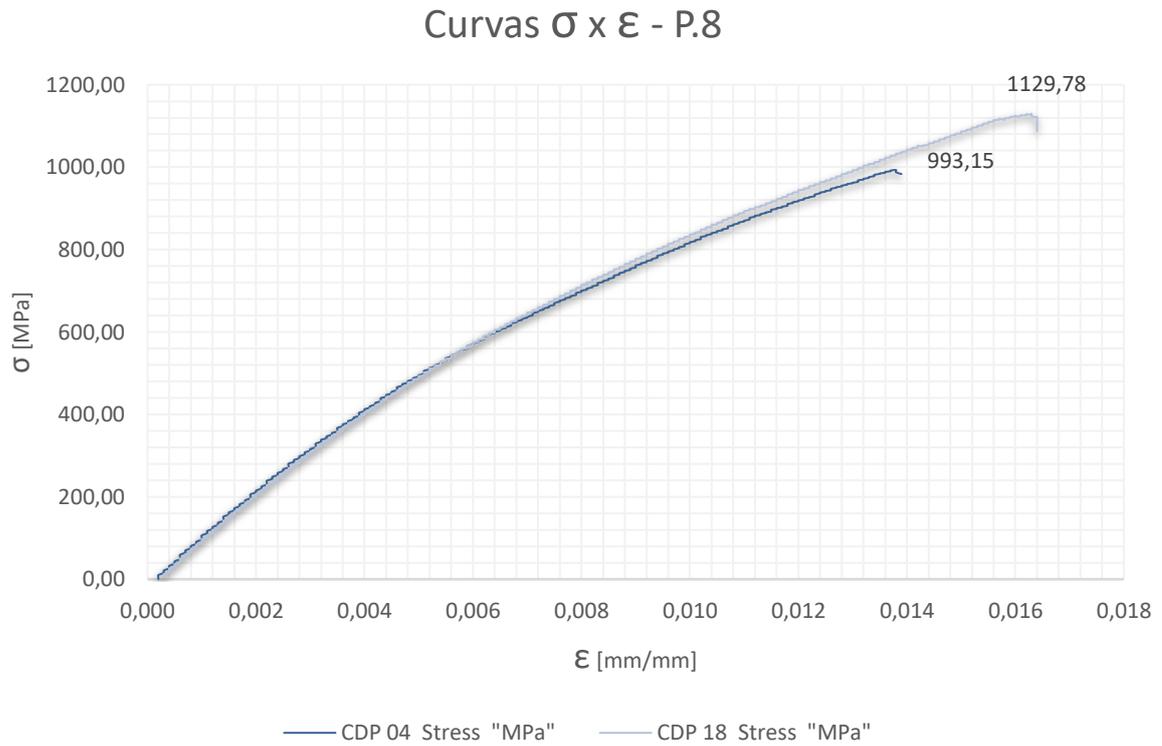
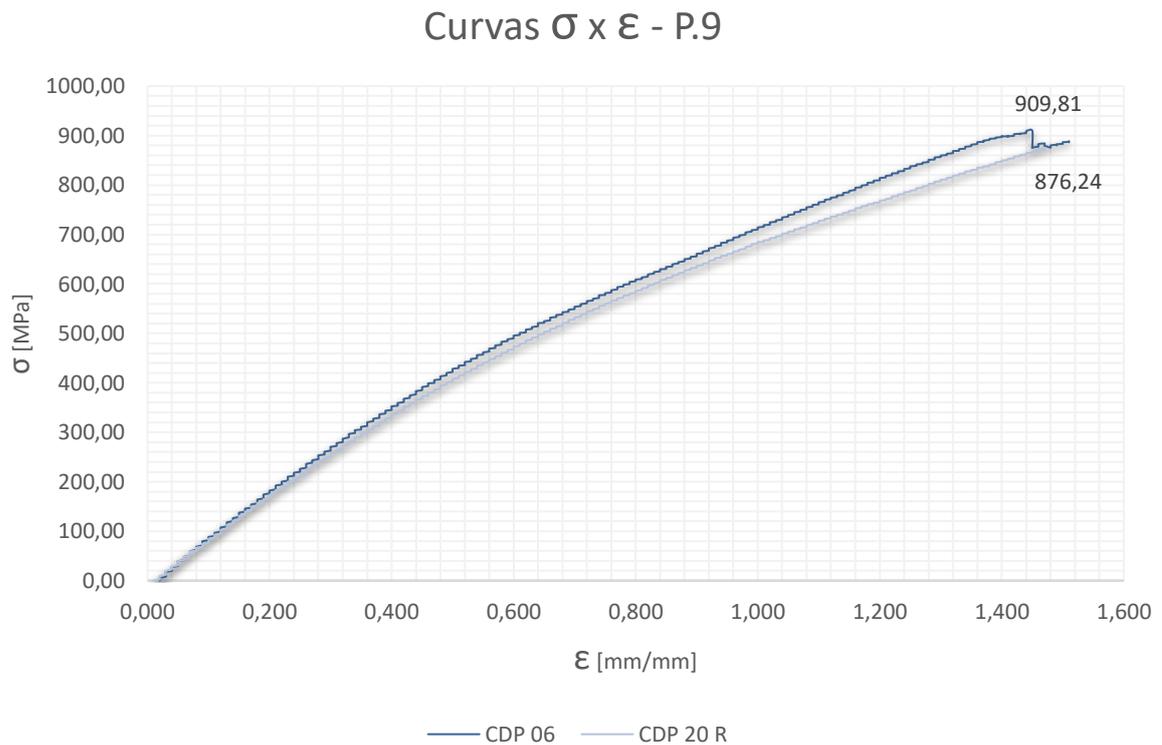


Figura 43 - Curva Tensão x Deformação P.9



Fonte: Autor

5.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

A análise das propriedades mecânicas se iniciou com os dados levantados sobre as amostras do ponto central. Por se tratarem de 12 amostras, uma análise preliminar se fez necessária. Esta análise teve como objetivos determinar a média das propriedades mecânicas selecionadas para a análise, em função dos parâmetros de processamento do ponto central.

Deste modo, foram calculadas a tensão limite de resistência mecânica, a tensão na fratura e o módulo de elasticidade desses corpos de prova utilizando as curvas P.5 e os dados obtidos durante os ensaios. A tabela 9 demonstra os resultados calculados.

Para as amostras do processamento em ponto central observou-se na média, valores muito próximos para as tensões de resistência mecânica e de fratura, com valores de 927 MPa e 925 MPa respectivamente. O módulo de elasticidade E também apresentou regularidade em seus valores, com uma média calculada de 89 GPa com desvio padrão de 7 GPa.

Estes valores calculados traduzem as percepções levantadas pela análise das curvas Tensão x Deformação

Tabela 9 - Análise das propriedades do material de Ponto Central

CDP	σ_r [MPa]	σ_f [Mpa]	E [Gpa]
CDP 09	839	792	87
CDP 10	918	918	97
CDP 11	1035	1035	95
CDP 12	905	868	85
CDP 13	904	904	91
CDP 14	966	935	87
CDP 23 R	928	927	90
CDP 24 R	1002	1002	90
CDP 25 R	844	822	69
CDP 26 R	926	923	88
CDP 27 R	1037	1037	86
CDP 28 R	1078	1071	94
Média	927	925	89
Desvio Padrão	76	87	7

Fonte: Autor

Após a determinação das propriedades do material produzido de acordo com os parâmetros médios, a análise foi expandida para os outros pontos do planejamento.

As propriedades para as outras amostras foram calculadas seguindo o mesmo método, por meio da média dos valores das propriedades desejadas foi obtida e consolidada em uma tabela o que possibilitou a comparação inicial entre os processamentos.

A média global de 1002 MPa para o limite de resistência mecânica é o principal indicativo de um excelente processamento, por indicar um valor consideravelmente alto para o material. O desvio padrão de 102 MPa pode ser explicado devido aos materiais que sofreram falhas prematuras, mais especificamente o CDP 16 R extraído da placa de processamento P.3, que fraturou sob uma tensão de 641 MPa. A tensão de fratura apresentou a mesma consistência, pois mesmo tendo observado a falha prematura em poucos casos, na média o valor se manteve elevado, com a tensão de fratura global sendo de 937 MPa com desvio padrão de 83 MPa.

Observando os valores obtidos para o módulo de elasticidade, nota-se que essa propriedade mostrou uma tendência a variar entre 88 GPa e 90 GPa, com apenas alguns casos saindo desse intervalo. O extremo ficou para o material produzido seguindo o processamento P.8, que resultou em 101 GPa para o módulo de elasticidade. O mesmo material resultou em elevados valores médios para as tensões, sendo 1061 MPa para o limite de resistência e 1035 MPa para a tensão de fratura. Este comportamento é validado ao observar a curva Tensão x Deformação para o tratamento P.8, pois nota-se que as curvas dos corpos de prova estão praticamente sobrepostas, variando apenas na tensão de ruptura. Vale ressaltar que, a média global do módulo de elasticidade, igual a 89 GPa, coincidiu com a média calculada para as amostras do ponto central.

Como última propriedade calculada, o coeficiente de Poisson (ν) resultou em valores coerentes com um compósito carbono-epóxi no qual o reforço é do tipo tecido de fibras em conjunto com um desvio padrão inexpressivo de 0,01. O valor calculado de 0,18 está aderente com o valor encontrado na literatura para esse tipo de material, sendo de 0,17 (PARK, 2017).

A tabela 10 consolida todos os valores obtidos através dos ensaios e das análises geradas utilizando os dados extraídos para cada uma das configurações de processamento, com suas respectivas médias e desvio padrão indicados.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração

Processamento	σ_r [MPa]	σ_f [Mpa]	E [Gpa]	v
P.1	1002	997	88	0,18
P.2	949	949	86	0,17
P.3	760	754	89	0,18
P.4	1007	1004	88	0,18
P.5 ©	927	925	89	0,18
P.6	1004	917	90	0,18
P.7	1107	937	89	0,18
P.8	1061	1035	101	0,20
P.9	893	882	85	0,17
Média	1002	937	89	0,18
Desvio Padrão	102	83	4	0,01

Fonte: Autor

Estes resultados indicam um impacto significativo gerado pelo processamento sobre as características do material resultante. A força de compressão desenvolvida pela prensa favoreceu a adesão entre as fases fibra e matriz, resultando em um material com ótimas propriedades mecânicas, também indicando maiores valores de propriedades para materiais que foram processados em pressões mais elevadas. A aplicação direta de calor promovida pela ferramenta também gerou resultados positivos, pois favoreceu a formação de ligações cruzadas, efeito esse que foi amplificado ao utilizar-se o procedimento de pós-cura. A excelente adesão pode ser evidenciada pelo fato de que durante os ensaios ocorreu apenas uma falha por delaminação e este fato se desenvolveu ao ensaiar um dos corpos de prova de teste, não impactando as análises realizadas posteriormente.

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Com todas as propriedades mecânicas obtidas, foi possível complementar o planejamento experimental com os resultados encontrados para que a análise estatística fosse realizada. A tabela 11 apresenta os resultados obtidos experimentalmente adicionados ao planejamento inicial.

Tabela 11 - Planejamento Experimental Completo

CDP	Réplica	Pressão	Temperatura	Resistência Mecânica	Módulo de Elasticidade
15	2	2,00	80,00	956,79	95,61
28 (C)	2	4,00	100,00	1077,84	93,77
5	1	1,17	100,00	1058,86	96,47
19	2	1,17	100,00	945,53	80,15
3	1	6,00	80,00	1150,64	86,66
26 (C)	2	4,00	100,00	925,62	87,78
13 (C)	1	4,00	100,00	903,55	90,64
9 (C)	1	4,00	100,00	839,39	86,98
8	1	4,00	128,28	1104,16	96,56
23 (C)	2	4,00	100,00	928,36	89,69
6	1	6,83	100,00	909,81	86,63
12 (C)	1	4,00	100,00	905,36	85,28
25 (C)	2	4,00	100,00	844,42	68,87
18	2	6,00	120,00	1129,78	98,58
21	2	4,00	71,72	1063,07	87,28
4	1	6,00	120,00	993,15	102,6
20	2	6,83	100,00	876,24	82,68
1	1	2,00	80,00	941,73	76,83
7	1	4,00	71,72	951,82	89,01
24 (C)	2	4,00	100,00	1001,98	90,47
27 (C)	2	4,00	100,00	1036,54	86,11
22	2	4,00	128,28	904,16	83,78
10 (C)	1	4,00	100,00	917,82	96,64
14 (C)	1	4,00	100,00	966,18	86,96
2	1	2,00	120,00	878,68	89,59
17	2	6,00	80,00	1063,18	91,36
11 (C)	1	4,00	100,00	1034,71	95,06
16	2	2,00	120,00	641,34	88,7

Fonte: Autor

Carregando os dados experimentais obtidos no software *Statistica TIBCO* as análises de variância foram feitas.

Considerando a tensão limite de resistência como variável dependente, a análise de variância com intervalo de confiança de 95% indicou que a temperatura foi a variável independente que mais se aproximou de gerar alguma influência sobre as propriedades mecânicas do material, pois apresentou um valor de $p = 0.0528$. Sabe-se que a influência é comprovada estatisticamente caso o valor de “p” encontrado seja menor ou igual a 0,05 O parâmetro de pressão não gera nenhuma influência sobre o processo, apresentando um valor de $p = 0.1398$, assim como a interação entre as variáveis independentes, que é inexistente para este caso.

Como uma análise aprofundada sobre o parâmetro temperatura, considerando que o processo de laminação de um compósito possui muitas etapas manuais, o que pode resultar em erros e em inconsistências de processo, torna-se razoável assumir um intervalo de confiança de 90% para esta análise. Possivelmente, ao fazer isso, a influência desta variável sobre as propriedades mecânicas do material pode ser estatisticamente comprovada, considerando que para o intervalo de confiança de 95% o valor de p já se aproximou muito dos 0,05 que comprovariam o impacto promovido por este parâmetro.

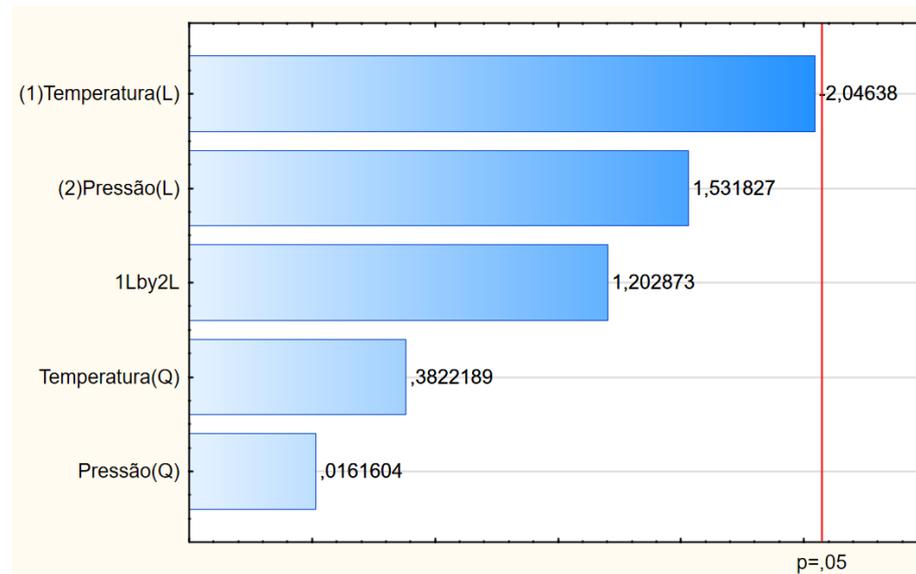
Os dados obtidos por meio da execução da ANOVA podem ser observados na tabela 12. O Diagrama de Pareto representado na figura 44 indica a proximidade dos resultados em relação ao valor de “p”.

Tabela 12 - ANOVA das variáveis independentes sobre a resistência mecânica

Factor	Effect	Std.Err.	t(22)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	935,938	32,13641	29,12390	0,000000	869,291	1002,584	935,9375	32,13641
(1)Temperatura(L)	-113,906	55,66189	-2,04638	0,052852	-229,341	1,530	-56,9528	27,83094
1L by 2L	94,687	78,71780	1,20287	0,241812	-68,563	257,938	47,3437	39,35890
(2)Pressão (L)	85,264	55,66189	1,53183	0,139820	-30,171	200,700	42,6322	27,83094
Temperatura(Q)	22,144	57,93473	0,38222	0,705966	-98,006	142,293	11,0719	28,96737
Pressão (Q)	0,936	57,93473	0,01616	0,987252	-119,213	121,086	0,4681	28,96737

Fonte: Autor. Adaptado do software *Statistica*.

Figura 44 - Diagrama de Pareto das variáveis independentes sobre a resistência mecânica



Fonte: Autor

Considerando o módulo de elasticidade como variável dependente, a análise de variância com intervalo de confiança de 95% indicou nenhum dos parâmetros selecionados como variáveis independentes promovem alguma influência sobre o comportamento mecânico do material. Os valores de p calculados foram de 0.394 para pressão e de 0.508 para a temperatura. A influência decorrente da interação das variáveis também não ocorre nesse caso, com a indicação de um valor de $p = 0.718$. Essa análise é suportada ao verificar-se os resultados obtidos experimentalmente para o módulo de elasticidade, uma vez que a variação encontrada nos dados experimentais foi pequena.

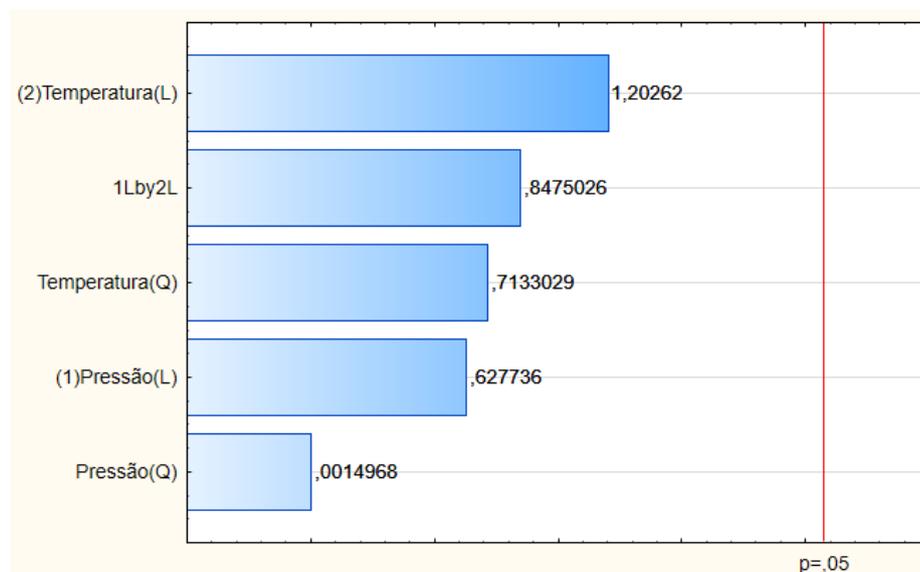
Os dados obtidos por meio da execução da ANOVA podem ser observados na tabela 1. O Diagrama de Pareto representado na figura 45 indica a proximidade dos resultados em relação ao valor de “ p ”.

Tabela 13 - ANOVA das variáveis independentes sobre o módulo de elasticidade

Factor	Effect	Std.Err.	t(22)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.
Mean/Interc.	88,18750	2,084589	42,30451	0,000000	83,86433	92,51067	88,18750	2,084589
(1)Pressão (L)	2,26651	3,610614	0,62774	0,536639	-5,22144	9,75447	1,13326	1,805307
Pressão (Q)	0,00562	3,758046	0,00150	0,998819	-7,78809	7,79934	0,00281	1,879023
(2)Temperatura(L)	4,34220	3,610614	1,20262	0,241908	-3,14576	11,83015	2,17110	1,805307
Temperatura(Q)	2,68063	3,758046	0,71330	0,483157	-5,11309	10,47434	1,34031	1,879023
1L by 2L	4,32750	5,106179	0,84750	0,405841	-6,26207	14,91707	2,16375	2,553089

Fonte: Autor

Figura 45 - Diagrama de Pareto das variáveis independentes sobre módulo de elasticidade



Fonte: Autor

5.4 COMPARAÇÃO COM LAMINAÇÃO MANUAL

Como último critério de análise e comparação, foram coletados dados de ensaios de tração realizados em um compósito carbono-epóxi produzido seguindo os mesmos procedimentos de cura e pós-cura, com a única diferença sendo a técnica de processamento empregada que neste caso foi a laminação a vácuo. Importante ressaltar que nesta etapa, um planejamento experimental não foi aplicado pois o processo não estava sendo analisado, sendo apenas utilizado como modo de preparação do material.

A tabela 14 indica os resultados obtidos por ensaios de tração seguindo os mesmos parâmetros aplicados para os materiais preparados por laminação termomecânica.

Tabela 14 - Ensaio de tração para laminação a vácuo

CDP	σ_r	σ_f	E	ν
CDP 1	379	379	16	-
CDP 2	596	596	22	0,33
CDP 3	482	482	23	0,16
CDP 4	564	564	24	0,07
CDP 5	625	625	24	0,10
CDP 6	550	550	24	0,22
Média	533	533	22	0,18
Desvio Padrão	89	89	3	0,11

Fonte: Autor

Ao compararmos os materiais produzidos por laminação a vácuo com as amostras produzidas por conformação termomecânica, nota-se uma diferença significativa. Primeiramente tem-se uma variação de 47% sobre a tensão limite de resistência do material, um valor não muito coerente uma vez que se trata de um mesmo material com composição e geometria semelhantes. Uma variação similar é notada para a tensão de ruptura, com um valor de 43%. No entanto a grande diferença é notada pela comparação entre os módulos de elasticidade, com uma variação de 75% entre os valores calculados. O coeficiente de Poisson se manteve dentro da média conhecida e citada pela literatura (tabela 15).

Tabela 15 - Comparação entre Laminação Manual e Laminação Termomecânica

Processo	σ_r [MPa]	σ_f [Mpa]	E [Gpa]	ν
Laminação Termomecânica	1002	937	89	0,18
Laminação Manual	533	533	22	0,18
Variação	47%	43%	75%	1%

Fonte: Autor

A variação positiva das propriedades mecânicas do material produzido pelo processo de laminação termomecânica era um fator esperado, uma vez que a pressão de compressão, um parâmetro crítico, seria diferente nos dois processamentos.

6 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivos avaliar a influência dos parâmetros de temperatura e pressão de um processo de laminação termomecânica de um compósito Carbono-Epóxi sobre as propriedades mecânicas deste material, mais especificamente a tensão limite de resistência mecânica e o módulo de elasticidade e também de verificar as variações encontradas entre as propriedades obtidas de um material produzido por laminação termomecânica em comparação com um compósito produzido por laminação manual com auxílio de vácuo. Com estes objetivos descritos, as principais conclusões deste trabalho foram:

- O processamento termomecânico de compósitos Carbono-Epóxi produziu materiais com propriedades mecânicas claramente superiores em relação aos materiais preparados por laminação a vácuo, chegando a valores de 1151 MPa para o limite de resistência a tração e 101 GPa para módulo de elasticidade, o que demonstra ótima adesão na interface fibra-matriz, fato observado durante a execução dos ensaios;
- O planejamento experimental de Ponto Central Composto permitiu a obtenção de análises e conclusões com uma quantidade mínima de ensaios, validando completamente o uso da estatística em trabalhos científicos;
- A variável independente temperatura apresentou influência apenas sobre a variável dependente tensão limite de resistência. Mas isto só é estatisticamente comprovado ao realizar um ajuste no intervalo de confiança da análise de variância, alterando o valor do intervalo de 95% para 90%, o que pode ser justificado devido a toda a manualidade existente no processo de laminação de compósitos;
- O mesmo comportamento não foi observado para a variável dependente módulo de elasticidade. A temperatura não apresentou nenhuma influência sobre essa propriedade mecânica do material;
- A variável independente pressão não gerou nenhuma influência sobre as variáveis dependentes. O valor de p calculado não se aproximou do valor esperado de 0,05;

- A análise da influência das variáveis independentes combinadas não indicou nenhuma influência sobre as variáveis dependentes, fato comprovado pelo valor de $p = 0,98$ e $p = 0,4$ para as análises de resistência a tração e módulo de elasticidade respectivamente. Portanto, pode-se afirmar que a combinação destes parâmetros não gera impacto sobre as propriedades mecânicas do material;
- A comparação entre os materiais obtidos por diferentes processamentos evidenciou uma grande variação entre as propriedades obtidas, fato este que deve ser analisado com maior nível de detalhamento em estudos futuros.
- A qualidade do processamento termomecânico pode ser evidenciada por diversos fatores, entre eles pode-se citar: Altos valores de tensões de resistência e fratura; Coerência nos valores obtidos para módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para todos os corpos de prova; Consistência na realização de ensaios, onde nenhuma falha que invalidasse o procedimento tenha ocorrido; A não observação de defeitos no material, como bolhas ou delaminação;

Este trabalho mostrou que o processamento de compósitos por laminação termomecânica pode favorecer o comportamento mecânico do material compósito Carbono-Epóxi, gerando componentes de elevadas propriedades mecânicas para diversas aplicações.

O processo também traz outros benefícios como a redução do tempo de processamento, uma vez que a cura a vácuo em estufa necessita de um maior tempo de cura para garantir a boa adesão entre as fases fibra e matriz.

A exceção do parâmetro de temperatura, nenhuma influência por parte das variáveis de processamento sobre as propriedades mecânicas do compósito foi comprovada pelas análises de variância realizadas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a finalidade de promover e incentivar trabalhos futuros nesta linha de pesquisa, seguem recomendações e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

- Avaliar as variações encontradas entre processos de fabricação diferentes com maior nível de detalhamento, aplicando o planejamento experimental também para a laminação a vácuo;
- Expandir os tipos de ensaios estudados para flexão e impacto. Sabe-se que as propriedades mecânicas de um compósito podem variar drasticamente em função das solicitações mecânicas;
- Refinar os intervalos de temperatura e pressão de modo a se obter um conjunto de parâmetros de processo ótimos para a produção do material;

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.** Standard D790-15, 2016.

American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard Test Method for Tensile Properties of Matrix Composite Materials.** Standard D3039/3039M-14, 2016.

CAI, Z. et al., **Formability of textile preforms for composite applications. Part 1: Characterization Experiments**, Composites Manufacturing, vol. 5, pp. 113-122, 1994.

CAI, Z. et al., **Formability of textile preforms for composite applications. Part 2: Evaluation Experiments and Modelling**, Composites Manufacturing, vol. 5, pp. 123-132, 1994.

CHAWLA, K. K., **Composite Materials Science and Engineering**, 2 ed., Springer, New York, 1998.

CHAWLA, K. K., **Composite Materials Science and Engineering**, 4 ed., Springer, New York, 2019.

CHEN, Q. et al., **Intra/inter-ply shear behaviors of continuous fiber reinforced thermoplastic composites in thermoforming processes**, Composite Structures, vol. 93, pp. 1692-1703, 2011.

CLYNE, T. W.; HULL, D., **An Introduction to Composite Materials**, 3 ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2019.

DAI, Z. et al., **Effect of heat treatment on carbon fiber surface properties and fibers/epoxy interfacial adhesion**, Applied Surface Science, vol. 257, pp. 8457-8461, 2013.

DÍAZ, R.; RUBIO, L., **Developments to manufacture structural aeronautical parts in carbon fiber reinforced thermoplastic materials**, Journal of Materials Processing Technology, vol. 143-144, pp. 342-346, 2003.

FRIEDERICH, K.; ALMAJID, A. A., **Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications**, Applied Composite Materials, vol. 20, pp. 107-128, 2012.

GUÉNON, V. A. et al., **Toughness properties of a three dimensional carbon-epoxy composite**, Journal of Materials Science, vol. 24, pp. 4168-4175, 1989.

HAMDAM, B. et al., **Optimizing the Manufacturing Processes of Carbon Fiber Epoxy Resin Composite Panels**, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 140, 2018.

HERAKOVICH, C. T., **Mechanics of Fibrous Composites**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.

HUANG, S. et al., **Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials - A critical review**, Journal of Materials Research and Technology, vol. 13, pp. 1441-1484, 2021.

KAZEMAHVAZI, S.; ZENKERT, D., **Corrugated all-composite sandwich structures. Part 1: Modelling**, Composites Science and Technology, vol. 69, pp. 913-919, 2009.

KAZEMAHVAZI, S.; ZENKERT, D.; TANNER, D., **Corrugated all-composite sandwich structures. Part 2: Failure mechanisms and experimental programme**, Composites Science and Technology, vol. 69, pp. 920-925, 2009.

LÀMETHE, J. F. et al., **Polymer dynamics applied to PEEK matrix composite welding**, Aerospace Science and Technology, vol. 9, pp. 233-240, 2005.

LESSARD, H. et al., **Influence of process parameters on the thermostamping of a [0/90]₁₂ carbon/polyether ether ketone laminate**, Composites: Part A, vol. 70, pp. 59-78, 2015.

LUBIN, G., **Handbook of Composites**, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1982.

MONTGOMERY, D. C., **Design and Analysis of Experiments**, 7 ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2008.

PARK, H., **Study on Design and Test of Composite WIG Vehicle Considering on Impact Loading**, MATEC Web of Conferences. 139. 00022. 10.1051/mateconf/201713900022, 2017.

PETERS, S. T., **Handbook of Composites**, 2 ed., Chapman & Hall, London, 1998.

NAIK, N. K.; GANESH, V. K., **Thermo-mechanical behaviour of plain weave fabric composites: Experimental investigations**, Journal of Materials Science, vol. 32, pp. 267-277, 1997.

SEFERIS, J. C.; NICOLAIS, L., **The Role of the Polymeric Matrix in the Processing and Structural Properties of Composite Materials**, Plenum Press, New York, 1983.

WANG, J. et al., **Wettability of carbon fibres at micro- and mesoscales**, Carbon, vol. 120, pp. 438-446, 2017.